



Analyse du travail de pilotage d'une centrale nucleaire (II) : les classes de situation

P. Alengry

► To cite this version:

P. Alengry. Analyse du travail de pilotage d'une centrale nucleaire (II) : les classes de situation. RR-1007, INRIA. 1989. inria-00075551

HAL Id: inria-00075551

<https://hal.inria.fr/inria-00075551>

Submitted on 24 May 2006

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



UNITÉ DE RECHERCHE
IRIA-ROCQUENCOURT

Institut National
de Recherche
en Informatique
et en Automatique

Domaine de Voluceau
Rocquencourt
BP 105
78153 Le Chesnay Cedex
France
Tél. (1) 39 63 55 11

Rapports de Recherche

N° 1007

Programme 8

ANALYSE DU TRAVAIL DE PILOTAGE D'UNE CENTRALE NUCLEAIRE (II) : LES CLASSES DE SITUATION

Pierre ALENGRY

Mars 1989



25

**ANALYSE DU TRAVAIL DE PILOTAGE
D'UNE CENTRALE NUCLEAIRE
(I I) : LES CLASSES DE SITUATION**

Pierre ALENGRY

Février 1989

Programme 8

Ce rapport a été rédigé dans le cadre d'une recherche réalisée par le Projet de Psychologie Ergonomique de l'INRIA, et financée en partie par le Comité des Etudes Médicales d'EDF-GDF (contrat n° : 1 86 D098 00 21123 01 1).

Analyse du Travail de Pilotage d'une Centrale Nucléaire

(II) : Les Classes de Situation

Résumé

Nous analysons dans ce rapport le travail de pilotage de centrale nucléaire du point de vue des différentes classes de situation que les opérateurs sont susceptibles de rencontrer. Chacune des classes est décrite en relation avec les caractéristiques du processus. Nous décrivons ensuite les principaux objectifs fixés à l'opérateur pour chacune de ces classes ainsi que les variables qu'il traite. Lorsque l'activité des opérateurs a été effectivement observée en salle de commande ou sur simulateur ou bien lorsque des interviews ont apporté des renseignements à ce sujet, nous décrivons les principales caractéristiques de l'activité. Les difficultés les plus significatives rencontrées par les opérateurs sont également reportées. Enfin, nous tirons quelques conclusions sur la nature des représentations mises en œuvre dans l'activité de conduite, sur sa dimension temporelle, sur les activités de surveillance, d'anticipation et de prévision et sur le rôle du contexte dans l'élaboration du travail de pilotage .

Mots-Clés : Conduite de centrale nucléaire - Conduite en situation normale - Conduite en situation dégradée - Représentations - Dimension temporelle - Activité de surveillance - Contexte.

Work Analysis of the Nuclear Power Plant Control Room Operators

(I) : The Classes of Situation

Abstract

This report presents a work analysis of nuclear power plant control room operators focused on the classes of situation they can meet during their job. Each class of situation is first described in terms of the process variables states. We then describe the goals of the operators and the variables they process in each class of situation. We report some of the most representative difficulties encountered by the operators in each class of situation. Finally, we conclude on different topics: the nature of the mental representations, the temporal dimension, the monitoring activity, and the role of the context in the work of controlling a nuclear power plant.

Keywords : Nuclear power plant control activity - Normal states of the process - Abnormal states of the process - Representations - Temporal dimension - Monitoring activity - Role of context.

TABLE DES MATIERES

I. INTRODUCTION.....	1
II. DESCRIPTION DES CLASSES DE SITUATION	1
1. Fonctionnement normal.....	2
1.1 Fonctionnement en état standard.....	2
1.2 Fonctionnement en transitoire lent.....	2
1.3 Fonctionnement en transitoire rapide (ou de grande amplitude)	2
2. Fonctionnement dégradé.....	2
2.1 Fonctionnement incidentel.....	2
2.2 Fonctionnement accidentel.....	3
III. ACTIVITE DE L'OPERATEUR EN SITUATION DE FONCTIONNEMENT NORMAL.....	3
1. Conduite des états standards	3
1.1 Description de la tâche	3
1.2 Activité de conduite en état de fonctionnement à pleine puissance.....	4
1.2.1 Caractéristiques de l'état du processus.....	4
1.2.2 Objectifs de la conduite.....	4
1.2.3 Principaux paramètres surveillés	6
1.2.4 Moyens de commande.....	9
1.2.5 Principales procédures de régulation mises en œuvre	10
1.3 Activité de conduite en état d'arrêt à froid pour intervention	12
1.3.1 Caractéristiques de l'état du processus	13
1.3.2 Objectifs de la conduite.....	13
1.3.3 Points de focalisation de l'activité de surveillance.....	14
1.3.4 Estimation par les opérateurs des événements plausibles.....	15
2. Conduite des transitoires lents	17
2.1 Conduite des passages entre états standards.....	17
2.1.1 Description de la tâche.....	18
2.1.2 Activité de conduite des passages entre état standards.....	18
2.2 Conduite des variations contractuelles de puissance.....	21
2.2.1 Description de la tâche.....	21
2.2.2 Activité de conduite des variations contractuelles de puissance.....	21
3. Conduite des transitoires rapides	25
IV. ACTIVITE DE L'OPERATEUR EN SITUATION DE FONCTIONNEMENT DEGRADE.....	26
1. Conduite des situations dégradées à l'aide de procédures	26
1.1 Traitement des symptômes de la situation dégradée	26
1.2 Actions immédiates.....	26
1.2.1 Actions de contrôle du fonctionnement des automatismes	27
1.2.2 Actions de confirmation du fonctionnement des automatismes.....	27
1.3 Actions différées.....	27
1.3.1 Stabilisation du processus.....	27
1.3.2 Passage en état de repli	28
2. Conduite des situations dégradées et mise en œuvre des fonctions de sûreté	
2.1 Description des fonctions de sûreté	28
2.2 Mise en œuvre des fonctions de sûreté	29
3. Exigences liées au changement de contexte	30
V. CONCLUSION.....	32
1. Représentations mises en œuvre dans la conduite.....	32
1.1 Représentation de la tâche	32
1.2 Représentation de l'état actuel de processus.....	33
1.3 Représentation d'états futurs du processus.....	33
1.4 Représentation conceptuelle du fonctionnement du processus.....	33
1.5 Représentation de l'espace du problème.....	37

1.5.1	Espace problème en régime stabilisé.....	38
1.5.2	Espace problème en régime transitoire.....	38
2.	La dimension temporelle de l'activité de conduite.....	41
2.1	Le temps comme un élément d'information à traiter.....	41
2.2	Le temps comme contrainte agissant sur la réalisation des tâches	41
2.2.1	Temps de réponse lent.....	41
2.2.2	Temps de réponse rapide.....	43
2.2.3	Temps de réponse moyen	43
2.2.4	Temps de réponse et initiative laissée aux opérateurs.....	43
3.	Activité de surveillance	44
4.	Activités d'anticipation et de prévision.....	45
4.1	Activité d'anticipation	45
4.2	Activité de prévision	46
4.2.1	Restriction du champ des possibles.....	46
4.2.2	Processus sous-jacents à l'élaboration de prévisions	46
5.	Rôle du contexte dans l'activité de conduite.....	47
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		49

I - INTRODUCTION

Dans un précédent rapport, le contexte socio-technique dans lequel s'élabore l'activité de pilotage d'une centrale nucléaire a été décrit (Alengry, 1988a). Nous analysons ci-dessous le travail de pilotage du point de vue des différentes classes de situation que les opérateurs sont susceptibles de rencontrer. Chacune des classes est décrite en fonction des caractéristiques de l'état du processus technologique auxquelles elles correspondent. Nous décrivons ensuite les principaux objectifs fixés à l'opérateur pour chacune de ces classes. Lorsque l'activité des opérateurs a été effectivement observée en salle de commande ou sur simulateur ou bien lorsque des interviews ont apporté des renseignements à ce sujet, nous décrivons les principales caractéristiques de l'activité. Les difficultés les plus significatives rencontrées par les opérateurs sont également reportées. Nous définissons et articulons les différentes représentations mentales mises en œuvre par les opérateurs dans l'activité de pilotage. Enfin, nous tirons quelques conclusions sur le facteur temporel dans l'activité de pilotage d'un système qui est un processus dynamique pouvant avoir des temps de réponse très lents ou, au contraire, très rapide. De même, des conclusions partielles sont faites sur les variations du traitement d'information dans les différentes classes de situation ainsi que sur les exigences liées au changement de contexte lorsque l'opérateur passe d'une classe de situation à l'autre.

II - DESCRIPTION DES CLASSES DE SITUATION

Les différentes situations que sont amenés à rencontrer les opérateurs dans leur tâche de contrôle peuvent être décrites par la hiérarchie des classes de fonctionnement présentée à la Figure 1.

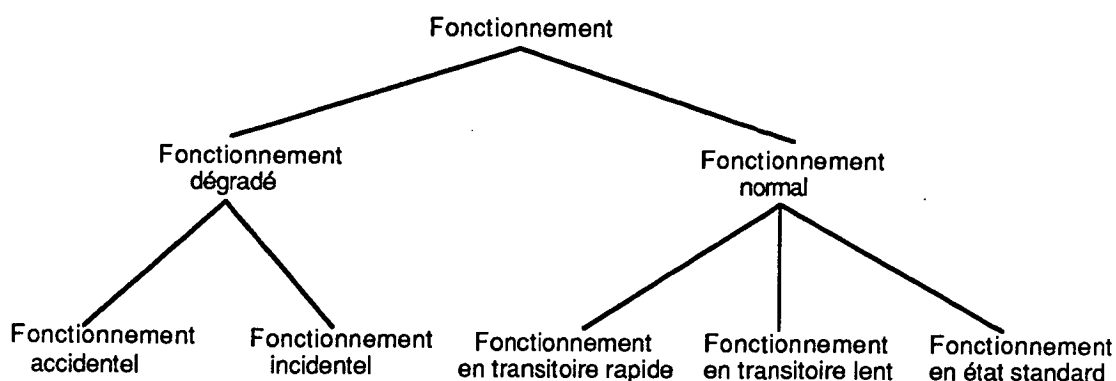


Figure 1: Hiérarchie des classes de situation

Chacune de ces classes de situations peut être caractérisée par des états du processus.

1. Fonctionnement normal

1.1 Fonctionnement en état standard

Cette classe de situation recouvre les configurations connues et stabilisées du processus. Il existe 9 états standards: (1) arrêt à froid pour rechargement; (2) arrêt à froid pour intervention; (3) arrêt à froid normal; (4) arrêt intermédiaire monophasique¹; (5) arrêt intermédiaire aux conditions du RRA²; (6) arrêt intermédiaire normal (ou biphasique); (7) arrêt à chaud; (8) attente à chaud; (9) fonctionnement en puissance. Chaque état standard est défini par des conditions qui sont des valeurs de paramètres physiques et des positions d'organe. Ces conditions sont vues du point de vue de la chaudière.

1.2 Fonctionnement en transitoire lent

Cette classe de situation recouvre les phases de démarrage et d'arrêt, les phases de passage contrôlé entre les états standards et les variations contractuelles de puissance, consistant à modifier le régime de puissance électrique fournie au réseau.

1.3 Fonctionnement en transitoire rapide (ou de grande amplitude)

Cette classe de situation recouvre les configurations où un événement³ a modifié instantanément l'état du processus mais où celui-ci reste en puissance et en automatique.

2. Fonctionnement dégradé

2.1 Fonctionnement incidentel

Cette classe de situation recouvre les défaillances électriques (par exemple: pertes d'alimentation) et les défaillances thermohydrauliques isolables (par exemple, mauvais fonctionnement du circuit RCV). Dans cette classe, la tâche consiste à définir un état de repli. Celui-ci est défini par la nature de l'indisponibilité du système défaillant.

¹ Le terme monophasique indique que le circuit primaire est en phase liquide. Le terme diphasique indique que le circuit primaire est en phases liquide et vapeur.

² Le RRA est un circuit qui a pour fonction de refroidir le circuit primaire.

³ Les événements possibles sont par exemple: ilôtage, déclenchement turbine sans Arrêt d'Urgence, perte des Turbo-Pompes Alimentaires.

2.2 Fonctionnement accidentel

Cette classe de situation recouvre les défaillances thermohydrauliques non isolables (c'est-à-dire pour lesquels il n'est pas possible de disposer un organe entre la fuite et le réacteur) avec perte de l'intégrité des barrières biologiques impliquant la mise en service de l'Injection de Sécurité.

Nous décrivons ci-dessous comment, en fonction de la classe de situation rencontrée, les exigences de la tâche, les objectifs, les actions et les paramètres physiques surveillés varient.

III - ACTIVITE DE L'OPERATEUR EN SITUATION DE FONCTIONNEMENT NORMAL

Les données sur lesquelles repose l'analyse de l'activité dans les différentes classes de situation ont été recueillies: par des observations en salle de commande et sur simulateur, par des interviews auprès des opérateurs et par des situations expérimentales de simulation de tâches de conduite hors contexte. Les sources de données sont à chaque fois indiquées.

1. Conduite des états standards

1.1 Description de la tâche

Dans cette classe de situation, la conduite consiste essentiellement à maintenir le processus dans une configuration respectant les conditions fixées par un état standard.

Un état standard est défini par rapport à 6 conditions principales, dont la valeur varie d'un état à un autre. Ces conditions sont les suivantes: (1) réactivité; (2) température moyenne; (3) contrôle de la température; (4) pression; (5) contrôle de la pression; (6) pompes primaires.

Nous avons pu réaliser deux phases d'observation en salle de commande pour deux états standards: (1) fonctionnement à pleine puissance; (2) arrêt à froid pour intervention. Une phase d'observation, d'une durée de 2 semaines, a été menée dans l'objectif de réaliser une première analyse du travail des opérateurs: lors de cette phase les deux tranches jumelées fonctionnaient à pleine puissance. Une deuxième phase d'observation, d'une durée d'une semaine, a été menée dans un objectif plus focalisé: il s'agissait d'identifier de quelle manière la représentation qu'ont les opérateurs de l'état du processus détermine leur représentation des évolutions plus ou moins plausibles de celui-ci. Lors de cette deuxième

phase d'observation, une tranche fonctionnait à pleine puissance et l'autre était en état d'arrêt à froid pour intervention. Les observations ont été centrées sur la conduite en état d'arrêt à froid pour intervention.

1.2 Activité de conduite en état de fonctionnement à pleine puissance

1.2.1 Caractéristiques de l'état du processus

L'état du processus dans cet état standard est caractérisé essentiellement par les conditions suivantes: (1) réactivité critique: $r\hat{o} = 0$; (2) $286^{\circ}\text{C} \leq \text{température moyenne} \leq 304,6^{\circ}\text{C}$; (3) contrôle de la température par les 3 GV, la turbine et le GCT; (4) pression = 155; (5) contrôle de la pression par le pressuriseur; (6) pompes primaires en service = 3.

1.2.2 Objectifs de la conduite

La Figure 2 décrit l'organisation des principales phases du travail de conduite en fonctionnement normal. L'objectif des opérateurs est de produire la puissance requise en fonction de la configuration du système, dans les conditions optimales de sécurité et de sûreté.

Trois grandes classes d'activités ont été identifiées:

- une **activité de régulation** dite de "suivi de charge". L'objectif de la conduite est de contrôler l'équilibre entre la puissance fournie (puissance nucléaire) et la puissance absorbée (puissance électrique). Cette dernière n'étant pas susceptible de varier, la tâche des opérateurs est de contrôler que la puissance fournie est toujours équilibrée avec la puissance absorbée. Lorsque la puissance fournie s'écarte des critères que se fixent les opérateurs, c'est-à-dire lorsque la puissance est trop élevée ou trop basse, les superviseurs sont amenés à utiliser des procédures de régulation dont l'objectif est de ramener la puissance à la valeur de consigne. Les actions entreprises dans ce cas consistent principalement à modifier la valeur des paramètres de concentration en bore et du niveau d'insertion des barres de commandes afin d'agir sur la réactivité et donc sur la puissance.
- une **activité de surveillance**. Lorsque la puissance produite est considérée comme acceptable, le travail des opérateurs consiste principalement en des activités de surveillance, orientées vers la détection d'un défaut. L'occurrence d'un défaut peut être détectée de deux manières: soit une alarme avertit l'opérateur, soit celui-ci identifie, au cours de surveillances de routine, qu'un paramètre dérive. Selon la nature du défaut, identifiable par un code couleur (blanc, jaune, rouge, vert), la récupération du défaut

peut nécessiter une intervention plus ou moins urgente et/ou critique (par exemple, une alarme blanche ne nécessite pas une intervention urgente au contraire d'une alarme rouge). Les procédures de récupération de dérives dépendent de l'évaluation que font les

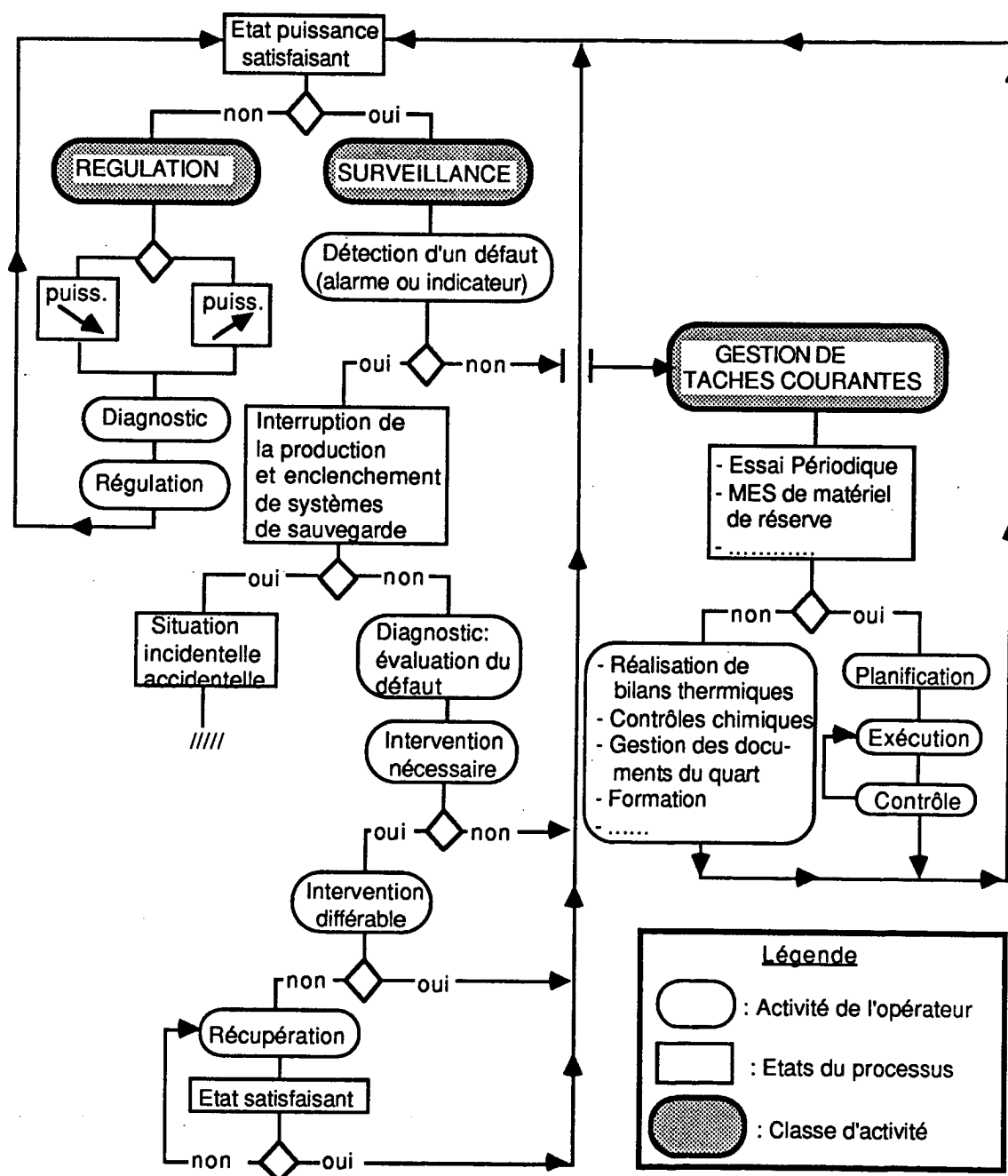


Figure 2: Organisation de l'activité de pilotage en fonctionnement à pleine puissance

superviseurs de ces dernières, cette évaluation est effectuée en tenant compte du sens de l'écart que traduit la dérive par rapport à une valeur de référence (plus/moins), de sa rapidité d'évolution ainsi que du paramètre concerné. L'apparition d'un défaut peut être associée à une interruption de la production et à une dégradation importante de l'état du système et imposer aux superviseurs d'utiliser une procédure accidentelle ou incidentelle pour résoudre l'incident (cf. § IV).

- une activité de **gestion de tâches courantes**, parallèlement à la surveillance du processus. Si aucun défaut n'est présent, les opérateurs peuvent avoir à réaliser diverses tâches de routine, consistant principalement: (1) à planifier, exécuter et contrôler des essais routiniers (par exemple: essai de l'Injection de Sécurité, essai de mouvement des barres) ou des manœuvres consistant à mettre en service du matériel de réserve par permutation; (2) à réaliser des bilans thermiques ou des contrôles chimiques; (3) à gérer les documents du quart (cahiers des relèves, bons de consignation, demandes de travaux); (4) à améliorer leur connaissance du système en étudiant des consignes ou des schémas logiques durant les périodes calmes.

1.2.3 Principaux paramètres surveillés

L'état-cible qui est surveillé en permanence est l'**équilibre entre les puissances nucléaire et électrique**. Cet état d'équilibre détermine un point de consigne pour la température moyenne (température moyenne de référence). L'ajustement de la **température moyenne** à son point de consigne est surveillé.

Un autre paramètre surveillé: le **xénon** qui est susceptible de faire varier la **réactivité** et donc, au bout de la chaîne causale, la puissance nucléaire fournie.

Enfin, la **forme du flux neutronique** est un autre paramètre surveillé car il constitue une indication sur l'état du cœur.

a) Surveillance de l'équilibre entre les puissances

Une information sur la **puissance électrique** est fournie par un indicateur numérique: selon les opérateurs cette information est peu fiable car il faut lui associer une marge d'erreur. Pour estimer l'état actuel de la puissance les opérateurs préfèrent se fier à l'information fournie toutes les 20 minutes par un calculateur sur le **bilan de la puissance thermique**: cette indication constituerait une image réelle de la puissance fournie par le réacteur (à 100% PN, la puissance thermique = 2775 MW). Une autre indication est utilisée par les opérateurs: il s'agit de celle donnée par le vide au condenseur; en effet, l'amélioration de la

qualité du vide assure une meilleure utilisation de la vapeur qui peut travailler plus longtemps, et donc permet de fournir plus de puissance.

b) Surveillance de la température moyenne

La surveillance de l'équilibre entre puissance fournie et puissance absorbée est effectuée par l'intermédiaire de la température moyenne. En effet, si la puissance fournie par le réacteur est différente de la puissance absorbée à la turbine, la température moyenne⁴ va varier. Ainsi, si la puissance fournie par le réacteur est inférieure à la puissance absorbée à la turbine, la différence va être absorbée sur la chaleur sensible du circuit et la température moyenne va baisser. Dans le cas inverse, l'excédent de puissance va échauffer le circuit primaire dont la température moyenne va s'élever. La détection d'une variation de la température moyenne permet donc de déduire une variation de la puissance.

Il faut donc distinguer deux niveaux dans l'activité de surveillance: la **surveillance de l'état-cible** (puissance fournie ajustée à la puissance absorbée) et la **surveillance de la variable-cible** (température moyenne = à sa référence pour un état-cible donné).

La **valeur de référence** de la température moyenne à 100% PN est de 304,6°C. L'objectif des opérateurs est de détecter et de réduire les écarts éventuels entre la température moyenne enregistrée et la température de référence. Les indicateurs qui fournissent des informations sur un éventuel écart sont les suivants:

- des enregistreurs permettent aux opérateurs d'identifier un écart: par exemple des courbes évoluant dans des directions opposées indiquent que la température moyenne s'écarte de la température de référence
- une vidéo indique les valeurs respectives de la température moyenne maximum et de la température de référence; un écart éventuel est identifié sur la vidéo par la comparaison des deux valeurs
- des indicateurs analogiques représentent sur une échelle l'état actuel de la température moyenne.

c) Surveillance du xénon

Le xénon est un poison neutrophage qui a une importance particulière du point de vue de la conduite car il influe sur la réactivité et donc sur la puissance. Les variations du xénon sont liées aux variations du flux neutronique (c'est-à-dire de la puissance nucléaire). Pour

⁴ La température moyenne est calculée à partir des températures de l'eau primaire en entrée et en sortie du réacteur, pour les trois boucles.

un fonctionnement à flux constant, la concentration en xénon atteint une valeur d'équilibre (2900 pcm). L'évolution du xénon est mise en suivi sur une imprimante du kit et sur une vidéo. Cette indication est, selon les opérateurs, particulièrement surveillée lors des arrêts de tranche, des montée en puissance et après un arrêt d'urgence (AU): c'est en effet dans ces situations que le facteur de variation du xénon, le flux, subit les variations les plus importantes.

d) Surveillance du flux neutronique

Le flux neutronique est une image de la puissance nucléaire. C'est la forme du flux neutronique qui intéresse les opérateurs car sa variation peut affecter l'état du cœur. Les principales conséquences d'une variation (radiale ou axiale) trop importante de la forme du flux sont les suivantes:

- une partie du combustible est plus sollicitée, ce qui provoque une usure irrégulière de celui-ci
- à l'endroit où le flux est maximum, il y a risque d'atteindre une valeur de température telle (point chaud) qu'il y ait détérioration du combustible.

A une dissymétrie trop importante dans la distribution axiale du flux correspondent en effet des écarts de puissance donc de température du combustible entre les parties hautes et les parties basses pouvant être dommageables pour celui-ci. L'objectif des opérateurs est d'évaluer à chaque instant cette dissymétrie pour la réduire et la ramener dans les limites acceptables pour le combustible.

Un moyen de contrôle de la symétrie du flux axial est fourni par une vidéo reproduisant l'évolution de l'axial offset⁵ (ou ΔI) sur trois intervalles temporels: 6 minutes, 4 heures, 24 heures.

Au cours de la phase d'observation, la marge de variation autorisée était de $\pm 5\%$. A $\pm 3\%$ de variation, une alarme jaune signale aux opérateurs qu'il est nécessaire d'intervenir pour ramener l'oscillation dans des normes acceptables.

Les observations ont montré que l'indicateur reproduisant l'évolution du ΔI (et qui fournit également une représentation de l'évolution de la puissance) est l'une des sources

⁵ L'axial offset est un rapport traduisant la plus ou moins grande dissymétrie axiale du flux neutronique dans le cœur du réacteur.

L'axial offset est défini par le rapport:

$$\text{axial offset} = \frac{\text{flux Haut} - \text{flux Bas}}{\text{flux Haut} + \text{flux Bas}} = \frac{\Delta \text{flux}}{\text{flux}}$$

d'information qui est la plus fréquemment consultée par les opérateurs. Cet indicateur est utilisé aussi pour contrôler l'évolution des oscillations xénon.

1.2.4 Moyens de commande

Deux moyens de commande sont à la disposition des opérateurs: les **barres de commande** et l'**acide borique** dissous dans l'eau primaire. Ces deux moyens de commande ont pour propriété d'être **neutrophages**, c'est-à-dire d'absorber les neutrons qui sont produits par les fissions des atomes d'uranium. Ils ont pour effet de modifier le nombre de neutrons qui provoquent les fissions et donc de modifier l'état de la réactivité du cœur.

a) Les barres de commande

Les barres de commande sont des grappes de matériau neutrophage: leur insertion dans le cœur entraîne une diminution de la réactivité et leur extraction a l'effet inverse, c'est-à-dire une augmentation de la réactivité. L'intensité d'une action des barres est mesurée en nombre de **pas d'insertion ou d'extraction**.

b) L'acide borique

La réactivité peut également être modifiée par la variation de la concentration de l'acide borique dans l'eau primaire: l'augmentation de la concentration en bore par injection d'acide borique dans le circuit primaire entraîne une diminution de la réactivité et la baisse de la concentration en bore (dilution par injection d'eau déminéralisée ou déborication par extraction du bore) entraîne une augmentation de la réactivité. L'intensité d'une action de borication/dilution est mesurée par un **débit** (m³/h) et une **concentration** (ppm d'antiréactivité).

c) Modalités d'utilisation des moyens de commande

Le temps de réponse du bore est lent (environ une dizaine de minutes) et permet le pilotage à long terme alors que l'effet des barres de commande est court (quelques secondes): celles-ci sont employées dans le contexte du pilotage à court terme, notamment pour contrôler les facteurs qui ont un effet rapide sur la réactivité (comme les effets de température du modérateur et Doppler). Cependant, alors que le bore fait varier la réactivité du réacteur de façon homogène dans le cœur, l'action des grappes entraîne une déformation du flux neutronique et donc risque de créer des points chauds sur certaines zones du cœur. L'inconvénient toutefois du bore est de provoquer des effluents liquides importants (il faut évacuer autant de volume d'eau primaire que de volume injecté). Du fait des avantages et inconvénients respectifs de ces deux moyens de commande, leur

utilisation est donc modulée par l'analyse de la situation effectuée par les opérateurs ainsi que par l'analyse des effets, à plus ou moins long terme, sur le comportement de l'installation.

1.2.5 Principales procédures de régulation mises en œuvre

a) Régulation de la température moyenne et de la puissance

La température moyenne du circuit constitue le paramètre permettant d'ajuster la puissance primaire à la puissance secondaire. Par exemple, dans le cas où la puissance secondaire augmente (donc où la température moyenne diminue), le réajustement à égalité des puissances primaire et secondaire est effectué en augmentant la réactivité du cœur, jusqu'à stabilisation de la température moyenne. Les paramètres physiques intervenant dans la régulation sont les suivants:

- la température moyenne de l'eau primaire (grandeur à régler)
- la réactivité du cœur (paramètre de réglage)
- le niveau d'insertion des barres (moyen de réglage)
- les facteurs de perturbation (par exemple une variation de la puissance absorbée par les générateurs de vapeur) faisant varier la température.

Un système de **régulation automatique** permet de maintenir la température moyenne dans des limites définies. La détection d'un écart de $\pm 0,8^\circ\text{C}$ de la température moyenne enregistrée par rapport à la température de référence provoque une action automatique sur la position des barres de commandes.

Cependant, dans certaines situations, les opérateurs procèdent **manuellement** à la régulation de la température, lorsque celle-ci est trop élevée. Cette procédure a (1) une *fonction opérative*: elle a pour but d'éviter les mouvements intempestifs des barres qui risquent de créer des variations trop importantes de l'évolution des oscillations xénon; (2) une *fonction économique*: elle permet d'éviter la mise en œuvre de procédures de borication/dilution pour compenser ces oscillations xénon. Dans ce cas de figure, la procédure manuelle est plus optimale que la procédure automatique. La décision des opérateurs de réguler en manuel permet de réaliser des ajustements qui ont l'intérêt d'entraîner une moindre déstabilisation de l'état du processus (évitement des variations du xénon) et également la mise en œuvre de procédures moins coûteuses (traiter les effluents consécutifs aux actions de borication/dilution).

Cet exemple illustre en outre que l'activité de conduite ne s'effectue pas seulement au coup-par-coup, en **feed-back** mais met en œuvre des stratégies anticipatrices, en **boucle ouverte**.

Si les opérateurs savent anticiper des variations non désirées de l'état du processus, il sont également en mesure d'anticiper les conséquences de telles actions. En effet, toute déconnection d'un automatisme présente un certain facteur de risque. Selon les opérateurs, le positionnement des barres de commande en mode manuel ne met pas en cause la sûreté car, en cas d'Arrêt d'Urgence, les barres sont automatiquement insérées dans le cœur par ouverture d'un disjoncteur. Cette action peut toutefois avoir une conséquence en cas d'ordre de baisse de charge à l'alternateur: sans régulation automatique de l'insertion des barres, le risque est de créer un déséquilibre entre la puissance absorbée et la puissance fournie. Si cela se produit, la conséquence est un enclenchement de l'AU.

b) Régulation des évolutions du xénon

Selon les opérateurs, il est nécessaire non seulement de connaître la **valeur** mais également l'**allure** de l'évolution du xénon. L'objectif des opérateurs est de limiter les oscillations xénon à une plage de variation acceptable. Cette plage de variation est la même que celle de l'axial offset, c'est-à-dire qu'elle est comprise entre -5% et +5% de variation. Avant que l'évolution n'atteigne le seuil de $\pm 5\%$, les opérateurs doivent, selon le langage utilisé en salle de commande, "tuer l'oscillation xénon". Il semble donc que les procédures de régulation de la variation du flux axial (ΔI) et de l'oscillation xénon soient identifiables. Le maintien du ΔI et de l'amplitude de l'oscillation xénon à l'intérieur de leur plage de variation autorisée est réalisé par action sur les barres de commande. Lorsque l'oscillation atteint son amplitude maximum, les barres doivent être insérées.

La tâche de régulation du xénon met en œuvre des sous-tâches consistant (1) en une **estimation temporelle** du moment où l'action devra être réalisée et (2) en une **estimation de l'intensité de l'action** correctrice.

(1) Le **temps** est ici important: l'action consistant à tuer l'oscillation xénon doit être faite 1 heure 30 avant qu'elle n'atteigne le seuil de $\pm 5\%$. Cependant, les opérateurs ne disposent pas pour réaliser cette action d'information qui indique directement le moment où ils devront effectuer cette action: ils doivent donc réaliser une **prévision**. Les indices sur lesquels est fondée cette prévision peuvent être prélevés sur un enregistreur reproduisant l'évolution du xénon sur plusieurs cycles. Les indices utilisés sont:

- l'allure de la courbe d'évolution (les amplitudes tendent à augmenter, à diminuer ou à rester stables)
- le moment où l'amplitude maximum a été atteinte.

La prévision est réalisée ici sur la base d'informations concernant des **états antérieurs** du paramètre concerné. Sachant que le cycle est de 24-28 heures, il s'agit d'identifier si au cours des cycles précédents l'oscillation a atteint ou non au même moment de la journée son amplitude maximum. A partir de ces informations, l'opérateur est en mesure de déduire si la prochaine amplitude maximum sera atteinte au même moment, plus tôt ou plus tard. C'est ce que montre l'exemple suivant:

Un opérateur décide qu'il faudra tuer l'oscillation à la prochaine amplitude maximum. Pour cela, il consulte l'enregistreur et note que l'avant-dernière amplitude maximum a été atteinte à 14 heures et que la dernière a été atteinte à 13 heures 30. IL en déduit que l'amplitude maximum suivante sera atteinte à 13 heures et que le moment propice pour enclencher l'opération permettant de tuer l'oscillation se situera vers 12 heures.

En ce qui concerne cette procédure de régulation, les opérateurs prennent leurs décisions en tenant compte de la **valeur actuelle** d'autres paramètres tels que la température moyenne, la concentration en bore, le niveau d'insertion des barres et la réserve de puissance.

(2) L'**intensité de l'action** permettant de tuer l'oscillation xénon, dans la configuration actuelle du processus (c'est-à-dire avec un combustible neuf), est estimée par les opérateurs à environ une insertion des barres de commande de 10 pas. Selon les opérateurs, l'estimation de cette intensité est plus complexe à déterminer dans certaines configurations de l'installation. En effet, les opérateurs notent que la régulation de l'oscillation xénon en début de vie ne pose pas trop de difficultés car les oscillations tendent à s'amortir mais que cette procédure est plus complexe à effectuer en fin de vie. Autrement dit, la réalisation de la procédure est déterminée par le **contexte** défini par l'état du processus.

1.3 Activité de conduite en état d'arrêt à froid pour intervention

Dans cette situation, les opérateurs ont amené le processus en arrêt à froid pour intervention dans le but de réaliser une intervention technique: le changement du 3^o étage de la turbine (corps Basse Pression 3).

1.3.1 Caractéristiques de l'état du processus

L'état du processus dans cet état standard est caractérisé essentiellement par les conditions suivantes: (1) réactivité sous-critique: $\rho \leq -5000$ pcm et concentration en bore ≥ 2000 ppm; (2) $10^{\circ}\text{C} \leq \text{température moyenne} \leq 60^{\circ}\text{C}$; (3) contrôle de la température par RRA; (4) pression = pression atmosphérique; (5) contrôle de la pression = néant; (6) pompes primaires en service = 0.

En outre, des caractéristiques particulières de la situation actuelle sont les suivantes:

- Injection de Sécurité bloquée: cet état est autorisé parce que les opérateurs contrôlent:
 - * la réactivité
 - * le confinement
- instrumentation voie B indisponible car non requalifiée, voie A disponible
- sas matériel ouvert

1.3.2 Objectifs de la conduite

Les objectifs principaux des opérateurs sont déterminés d'une part par les caractéristiques de l'état du processus et, d'autre part, par l'activité des opérateurs en local sur le matériel.

a) Contrôle de l'état du processus

Les objectifs sont:

- de contrôler en permanence si les alarmes qui apparaissent sont normales ou non (une alarme est estimée normale par les opérateurs si son origine est liée à l'état du processus ou bien à des interventions par les services techniques)
- de contrôler en permanence la masse d'eau primaire pour s'assurer de la disponibilité d'une source froide permettant d'évacuer la chaleur provoquée par la réactivité résiduelle
- de contrôler en permanence la réactivité, par l'intermédiaire du contrôle de la concentration en bore dans l'eau primaire
- de maintenir une température moyenne entre 10°C et 60°C , c'est-à-dire en moyenne à 40°C .
- de contrôler le système de ventilation (EBA) du Bâtiment Réacteur

b) Contrôle de l'activité des opérateurs en local sur le matériel

Outre la réparation qui a motivé le passage de la centrale à ce régime de fonctionnement de nombreuses interventions de maintenance sont réalisées (par exemple: fonctionnement des vannes, examen de circuits...).

Les objectifs sont:

- d'effectuer un suivi journalier des travaux en cours
- d'être au courant du matériel consigné et donc de superviser les consignations
- de suivre les régimes d'essai (remplacement et manœuvre de matériels)

Les consignations constituent particulièrement dans cette situation une source de surcharge du travail de pilotage. Une consignation est une action consistant à disposer un matériel dans un état rendant possible le travail en assurant la sécurité du personnel et de l'installation. Le problème lié aux consignations vient du fait qu'elles sont nombreuses et complexes à superviser.

1.3.3 Points de focalisation de l'activité de surveillance

L'activité de surveillance est focalisée: (1) sur les paramètres permettant de détecter une défaillance mettant en cause les fonctions de sûreté; (2) sur les actions effectuées par des opérateurs en local sur le matériel.

Les points sur lesquels porte la surveillance des travaux effectués par les opérateurs en local sont décrits ci-dessus (cf. § III - 1.3.2). Les fonctions de sûreté particulièrement surveillées par les opérateurs concernent le contrôle de la réactivité et le refroidissement du cœur.

a) Surveillance de la réactivité

La réactivité doit continuer à être contrôlée, à cause de la réactivité résiduelle. Le risque réside dans une redivergence incontrôlée du réacteur. Les variations éventuelles de la réactivité sont surveillées en permanence par l'intermédiaire des chaînes sources: l'augmentation du niveau des chaînes sources traduirait une augmentation de la réactivité.

b) Surveillance du refroidissement

Le refroidissement est assuré par le maintien d'une masse d'eau constante dans le primaire et d'une circulation assurée par le circuit RRA. Le risque lié à la perte du refroidissement réside dans un échauffement. Deux fonctions entrent dans le refroidissement:

- la **masse d'eau primaire**. Les variations éventuelles de la masse d'eau primaire sont surveillées par l'intermédiaire du niveau pressuriseur: la diminution du niveau pressuriseur traduirait une perte de masse d'eau primaire.
- la **circulation de l'eau primaire**. Les variations éventuelles de la circulation sont surveillées par l'intermédiaire de l'indication de débit du RRA: un très bas débit RRA traduirait une diminution de la circulation dans le circuit primaire.

Par ailleurs, une variable fournissant une indication directe sur le refroidissement est surveillée en permanence: la température moyenne du circuit primaire: une élévation anormale de la température indiquerait que la fonction de refroidissement n'est pas réalisée normalement et conduirait à examiner les valeurs des variables liées à la masse d'eau (niveau pressuriseur) et à la circulation (débit RRA) pour diagnostiquer quelle est la fonction qui n'est plus réalisée.

1.3.4 Estimation par les opérateurs des événements plausibles

Nous avons réalisé une **expérience** en salle de commande **pour identifier la façon dont les opérateurs construisent des systèmes d'attente dans une classe de situation donnée**. Ces systèmes d'attente constituent des contextes propres à des classes de situation données. Nous avons demandé aux opérateurs de faire des prévisions sur les événements futurs qui pourraient modifier l'état du processus, en précisant le degré de plausibilité de ces événements.

Une première catégorie de prévision concerne les états futurs normaux du processus, de l'état actuel jusqu'à la montée à pleine puissance: les opérateurs décrivent les principales interventions qu'ils vont avoir à réaliser pour passer de l'état standard d'arrêt à froid à l'état standard de fonctionnement à pleine puissance. Deux grandes phases sont distinguées par les opérateurs:

- avant la divergence du réacteur: tester les traversées enceinte; requalifier le système ISBP (Injection de Sécurité Basse Pression); arrêter le système RRA; faire la bulle au pressuriseur; monter en température suivant un gradient de 28°C/h; monter en pression
- après la divergence du réacteur: monter en puissance; effectuer les paliers; rester 2 mois en télérégulation pour stabiliser la chaudière.

Les opérateurs soulignent que ces phases sont longues (par exemple, le premier redémarrage va s'effectuer sur 2 relèves) et doivent être réalisées par plusieurs équipes, d'où l'importance des relèves.

Une deuxième catégorie de prévision concerne les états futurs anormaux du processus. Ces états sont estimés en premier lieu en relation avec la mise en cause des fonctions de sûreté (refroidissement et contrôle de la réactivité) puis par rapport à des défaillances de systèmes.

a) Mise en cause du refroidissement du cœur

La mise en cause de cette fonction peut se produire par perte de la masse d'eau primaire à cause d'une fuite sur le circuit primaire ou bien à cause de la perte de la circulation.

Une perte d'eau primaire par fuite du circuit primaire est jugée très peu plausible par les opérateurs car, expliquent-ils, le circuit primaire est à pression atmosphérique.

Est jugée plus plausible une perte d'eau due à une soupape du circuit RRA qui resterait ouverte provoquant une perte de la circulation (il n'y aurait plus d'eau à l'aspiration des pompes RRA).

Dans cette situation, les opérateurs savent à l'avance quelle **fonction de substitution** ils devraient mettre en œuvre pour maintenir la fonction de refroidissement: cette fonction est remplie par la bache PTR. La mise en œuvre de cette fonction nécessite d'activer une autre fonction pour assurer un débit d'eau en provenance de la bache PTR: les pompes ISBP. Les actions consisteraient à mettre en service la pompe ISBP 1PO et d'ouvrir la vanne 65 VP RIS pour refouler l'eau en branche froide, directement dans le cœur. Cette action requiert une intervention rapide. Par ailleurs, les opérateurs soulignent que la probabilité d'une indisponibilité de la bache PTR est très faible ("Il faudrait pour cela qu'un avion tombe dessus").

Une autre cause de perte d'eau pourrait provenir d'une fuite sur la liaison entre les circuits RRA/RCV. L'action correctrice envisagée consiste à fermer une vanne pour isoler cette liaison.

Enfin les opérateurs évoquent la possibilité de la perte d'une pompe RCV provoquant la perte de la charge mais surtout de l'injection aux joints: dans ce cas, les opérateurs soulignent qu'il faut isoler la décharge pour conserver la masse d'eau primaire puis remettre en service l'injection aux joints.

b) Mise en cause du contrôle de la réactivité

Le contrôle est assuré par les conditions suivantes: (1) barres de commande complètement insérées; (2) concentration en bore = 2000 ppm; (3) effet de puissance = 0; (4) xénon pratiquement = 0. Pour que la réactivité varie, il faut, selon les opérateurs, que l'une de ces conditions varie. La source de variation la plus plausible concerne la concentration en bore, notamment à cause de dilutions intempestives (qui ont pour effet de diminuer la concentration en bore). Cette éventualité est jugée très plausible, selon les opérateurs, qui évoquent un problème de ce type qu'ils ont rencontré du fait d'un indicateur (boremètre) défaillant: à la suite d'une dilution intempestive, la concentration en bore est passée de 2000 ppm à 1000 ppm. Cette éventualité amène les opérateurs à contrôler fréquemment le système de borication/dilution. Un débit anormal donné par le boremètre amènerait les opérateurs d'abord à vérifier que le capteur donne une indication correcte puis à religner le circuit et à recalculer l'appoint en bore nécessaire.

Enfin d'autres types de défaillances sont envisagées par les opérateurs:

- cristallisation du bore en concentration dans l'eau primaire dans le cas où la température descendrait en-dessous de 10°C
- perte des sources électriques pour lesquelles des procédures incidentelles existent

2. Conduite des transitoires lents

Pour cette classe de situation, des données ont été recueillies en ce qui concerne l'activité des opérateurs dans les sous-classes: (1) de passage entre états standards; (2) de variation contractuelle de puissance.

2.1 Conduite des passages entre états standards

Des observations concernant cette situation n'ont pas pu être recueillies. Les données qui ont été utilisées pour l'analyse de l'activité des opérateurs dans cette situation ont été recueillies par des interviews: (1) des opérateurs de la tranche en état d'arrêt à froid: il leur a été demandé de décrire les principales étapes qu'ils allaient suivre pour passer de l'état dans lequel ils se trouvaient jusqu'au fonctionnement à pleine puissance (cf. § III - 1.3.4); (2) d'instructeurs sur simulateur ayant une solide expérience dans l'exploitation des centrales.

2.1.1 Description de la tâche

La tâche consiste à passer d'un état standard à un autre en réalisant les conditions pour l'état standard-cible, c'est-à-dire les valeurs prescrites de paramètres physiques ou de positionnement d'organe. La réalisation de la tâche est effectuée à l'aide de consignes décrivant le plan d'action (séquences des actions) approprié. Par exemple, le passage de l'état standard n° 2 (Arrêt à froid pour intervention) à l'état standard n° 3 (Arrêt à froid normal) est défini par la séquence des objectifs suivants:

- monter la pression à 2 bar par RCV
- mettre en service les pompes primaires
- régler la température entre 70 et 90°C par RRA

2.1.2 Activité de conduite des passages entre état standards

L'activité de conduite en transitoire lent est caractérisée par les points suivants.

a) Répartition de l'activité sur des délais temporels importants

L'obtention des conditions désirées pour passer d'un état à un autre nécessite des délais importants (un passage entre état standard est de l'ordre de la demi-journée; des actions de redémarrage peuvent s'échelonner sur deux relèves). L'activité est répartie dans le temps. De ce fait, les relèves, réalisées à tous les niveaux d'exécution, sont des étapes cruciales: une part importante du travail est réservée au remplissage des documents assurant la coordination entre les équipes (journaux de bord, mains courantes...).

b) Implication de l'ensemble de l'équipe.

L'ensemble de l'équipe de conduite est nécessaire pour la réalisation des tâches, du Chef de Quart (CDQ) aux rondiers, en passant par les Agents Techniques (AT), l'Adjoint Chef de Quart (ACDQ) et les services techniques (chimistes, mécaniciens, automaticiens...). Plusieurs acteurs interviennent sur le processus pour réaliser un but commun mais par des voies différentes, à différents niveaux de la hiérarchie fonctionnelle du processus. Chacun de ces acteurs n'a qu'une vue partielle de l'objectif général qu'il faut atteindre. L'activité du Chef de Bloc (CDB) consiste à organiser ce morcellement d'activités: il travaille à partir d'une représentation abstraite de l'état du processus et des interventions en cours de réalisation pour synchroniser les interventions des autres opérateurs. Par exemple, l'atteinte d'un but global: pressuriser le circuit primaire nécessite un ensemble de tâches partielles, réalisées par des opérateurs différents:

embrocher des pompes et des vannes -> ACDQ
 disposer des capteurs -> ACDQ
 assurer l'alimentation électrique -> CDQ
 ligner les circuits -> rondiers

Le CDB a la fonction qu'a un chef d'orchestre qui dirige un orchestre symphonique: chaque action doit être réalisée à un moment précis et en relation temporelle avec d'autres actions (avant, simultanément, après) pour obtenir l'état global désiré.

c) Travail en temps partagé et augmentation de la charge de travail

La conduite, du point de vue du CDB, est caractérisée par l'exécution de multiples tâches en temps partagé et par une charge de travail que les opérateurs estiment être la plus importante en regard des autres classes de situation. Ces caractéristiques de l'activité sont des facteurs d'erreur tels que des oublis, des mauvaises coordinations entre les opérateurs.

d) Réalisation de prérequis par la mise en œuvre d'une hiérarchie d'abstraction fonctionnelle

Les conditions requises pour passer d'un état standard à un autre sont des prérequis. L'activité de conduite des passages entre états standards consiste à obtenir ces prérequis par la mise en œuvre d'une représentation de la hiérarchie d'abstraction fonctionnelle du processus, telle que l'a décrite Rasmussen (1986).

Une action sur une composante élémentaire peut être un prérequis pour la mise en service d'une **composante** de plus haut niveau (par exemple: mettre en service le système de graissage d'une pompe avant de la démarrer). A une composante est associée une **fonction physique** (mécanique, chimique, électrique...). A un niveau supérieur, un ensemble de fonctions physiques est un prérequis pour la mise en œuvre d'une **fonction générique** (par exemple: la mise en route des pompes primaires et l'établissement d'un débit sont des prérequis pour assurer la fonction de circulation). A un niveau encore supérieur, un ensemble de fonctions génériques constitue un prérequis pour la mise en œuvre d'une **fonction abstraite** (par exemple: une circulation, une masse d'eau et une source de chaleur sont des prérequis pour la fonction de transfert de chaleur). Enfin, un ensemble de fonctions abstraites constituent un prérequis pour la réalisation de l'**objectif général du processus** (par exemple: les transferts de masse et d'énergie sont des prérequis pour la production d'électricité).

Les consignes d'exploitation décrivent la mise en œuvre de cette hiérarchie fonctionnelle de manière plus ou moins explicite. Néanmoins, pour construire une représentation abstraite de l'état du processus et des interventions en cours de réalisation afin de synchroniser les actions des différents opérateurs, le CDB doit travailler à partir d'une représentation de la hiérarchie fonctionnelle du processus.

e) Contrôle des prérequis

L'obtention des prérequis, c'est-à-dire l'atteinte de leurs buts respectifs par les différents acteurs, est considérée comme acquise lorsqu'un acteur prévient le CDB que son but est atteint. Cependant, la vérification de ces prérequis est effectuée au cours mêmes de leur réalisation. Cette vérification est effectuée par l'intermédiaire des critères propres au CDB, vus de sa salle de commande. Par exemple, pour vérifier que des circuits ont bien été lignés, il va établir entre un débit d'eau entrant et un débit d'eau sortant. De même, pour vérifier qu'une pompe a bien été embrochée, il va consulter un ampèremètre pour vérifier que la pompe prend bien sa charge. Ou, pour vérifier qu'une pompe est bien en service, il suit sur une vidéo la montée en température des paliers de cette pompe.

Le CDB utilise donc des **heuristiques de contrôle** fondées sur sa connaissance des variables caractérisant l'état d'un système donné.

f) Estimations temporelles

Le plan construit ou évoqué préalablement à l'activité fournit des estimations sur les délais nécessaires aux interventions. Cependant, ces estimations présentent une certaine marge d'erreur que les opérateurs évaluent être de l'ordre de la 1/2 heure. La variabilité des estimations temporelles est directement liée à des aspects relevant de l'organisation du travail: il s'agit de définir le temps nécessaire pris par chacune des interventions des différents opérateurs.

g) Estimation des systèmes disponibles

Dans certaines situations, notamment en fin d'arrêt de tranche et en redémarrage, le CDB peut rencontrer des difficultés pour contrôler l'état global du processus, car il se peut qu'il ne sache pas toujours exactement les systèmes qu'il a à sa disposition et il ne peut déduire immédiatement si les alarmes apparaissant en salle de commande sont liées à un défaut physique effectif ou bien à l'indisponibilité d'un système intervenant dans une manœuvre de modification du régime de fonctionnement du processus.

2.2 Conduite des variations contractuelles de puissance

2.2.1 Description de la tâche

Une variation contractuelle de puissance est une tâche consistant à modifier la puissance électrique fournie au réseau: cette variation peut aller jusqu'à un écart de 10% de la puissance ou bien être une variation de 5% PN/mn. Dans cette classe de situation, les opérateurs ont pour contrainte principale d'atteindre effectivement le nouvel état de puissance électrique exigé dans les délais qui leur ont été fixés.

2.2.2 Activité de conduite des variations contractuelles de puissance

Les opérateurs ne disposent pas de consigne pour réaliser cette tâche: celle-ci fait donc appel uniquement à l'expérience des opérateurs. Cette tâche a fait l'objet d'une analyse approfondie: une situation expérimentale hors-contexte a été montée où la consigne était de demander à des opérateurs de simuler et de justifier leur activité telle qu'ils l'élaboreraient en situation réelle. Les résultats de cette expérience sont reportés dans Alengry (1988b). Nous résumons ci-dessous les éléments les plus caractéristiques de l'activité des opérateurs dans cette situation.

a) Objectif de la conduite

L'objectif de la conduite est d'effectuer les variations de charge (augmentation-diminution) en fonction des exigences (1) du nouvel état de puissance électrique demandé; (2) du moment où doit se produire la variation; (3) du gradient de variation fixé.

Le moment où le nouvel état de puissance doit être atteint est calculé en fonction de l'écart et du gradient de la variation de puissance.

Les commandes de variation de puissance et du gradient de variation sont effectuées à l'aide de relais, par positionnement de points de consignes.

b) Etat-cible = maintien de l'équilibre global du système

Cependant, une contrainte qui joue sur l'atteinte de l'objectif est de maintenir un équilibre entre puissances nucléaire et électrique: cet équilibre est l'état-cible des opérateurs. Comme la puissance électrique est prioritaire par rapport à la puissance nucléaire, c'est celle-ci qui est contrôlée et régulée par les opérateurs. Le contrôle de la puissance nucléaire consiste à contrôler principalement les variables qui peuvent la faire varier.

c) Contrôle des variables risquant de faire varier l'état-cible

Deux variables peuvent faire varier la puissance nucléaire: le xénon et le Delta I.

* Contrôle et régulation du xénon

Les variations de puissance nucléaire entraînent des variations du xénon qui font varier en retour la puissance nucléaire. Pour contrôler le xénon, les opérateurs utilisent une représentation de l'interaction xénon-puissance nucléaire, et son mécanisme explicatif: la réactivité (Figure 3).

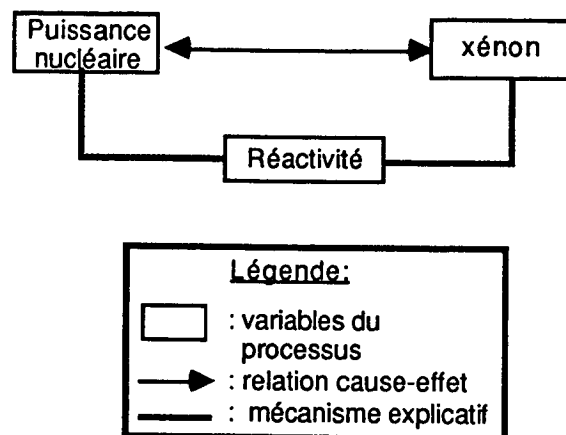


Figure 3: Représentation de l'interaction causale xénon-puissance nucléaire et de son mécanisme explicatif

Les variations du xénon sont régulées en modifiant la réactivité du cœur, par l'intermédiaire de la concentration en bore de l'eau primaire (Figure 4).

Pour contrôler le xénon, les opérateurs procèdent de deux manières:

- par **régulation en boucle ouverte**: les opérateurs prévoient quelle va être l'évolution de cette variable en fonction de la variation de la puissance nucléaire: un calcul préalable (bilan de réactivité) leur permet d'inférer cette évolution. En fonction de ce résultat, les opérateurs ajustent l'intensité de l'action correctrice: la concentration en bore dans l'eau primaire. L'action consiste en l'établissement d'un débit en continu, parallèle et proportionnel à l'évolution du xénon.

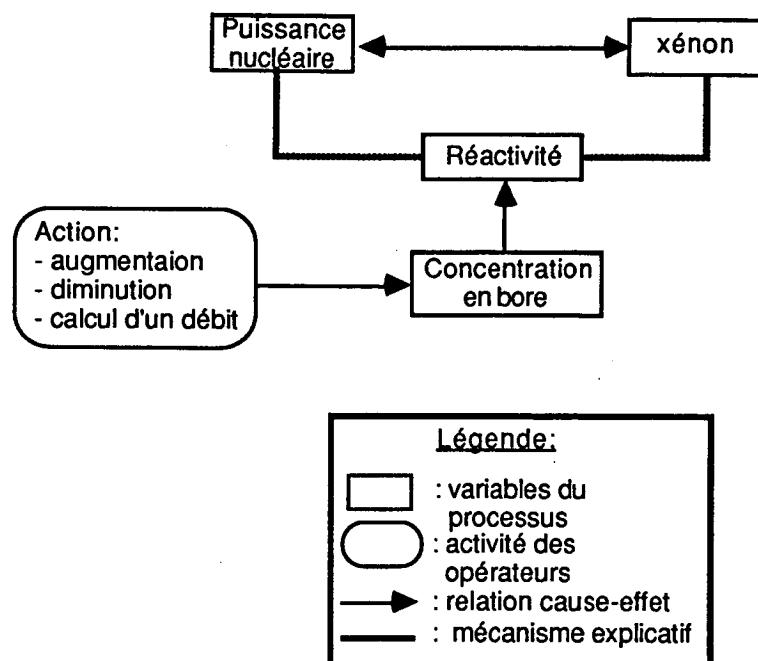


Figure 4: Action correctrice utilisée pour réguler l'interaction xénon-puissance nucléaire

- par **régulation en boucle fermée**: les opérateurs contrôlent au coup-par coup l'effet de l'évolution du xénon sur la puissance nucléaire. L'activité de contrôle est ici indirecte: les effets de la variation du xénon sur la puissance nucléaire sont réglés par une variable intermédiaire: la température moyenne. Cette action de contrôle repose sur une représentation de la relation causale puissance nucléaire->température: la température donne une indication sur les variations de puissance nucléaire et les actions de régulation consistent à ajuster la température sur sa consigne. L'action régulatrice est effectuée au coup-par-coup. Les heuristiques de conduite utilisées dans ce cas sont les suivantes:

Si la température moyenne diminue

- > [inférences] : le xénon augmente; la réactivité diminue
- > [décision] : augmenter la réactivité
- > [action] : diluer

Si la température moyenne augmente

- > [inférences] : le xénon diminue; la réactivité augmente
- > [décision] : diminuer la réactivité
- > [action] : boriquer

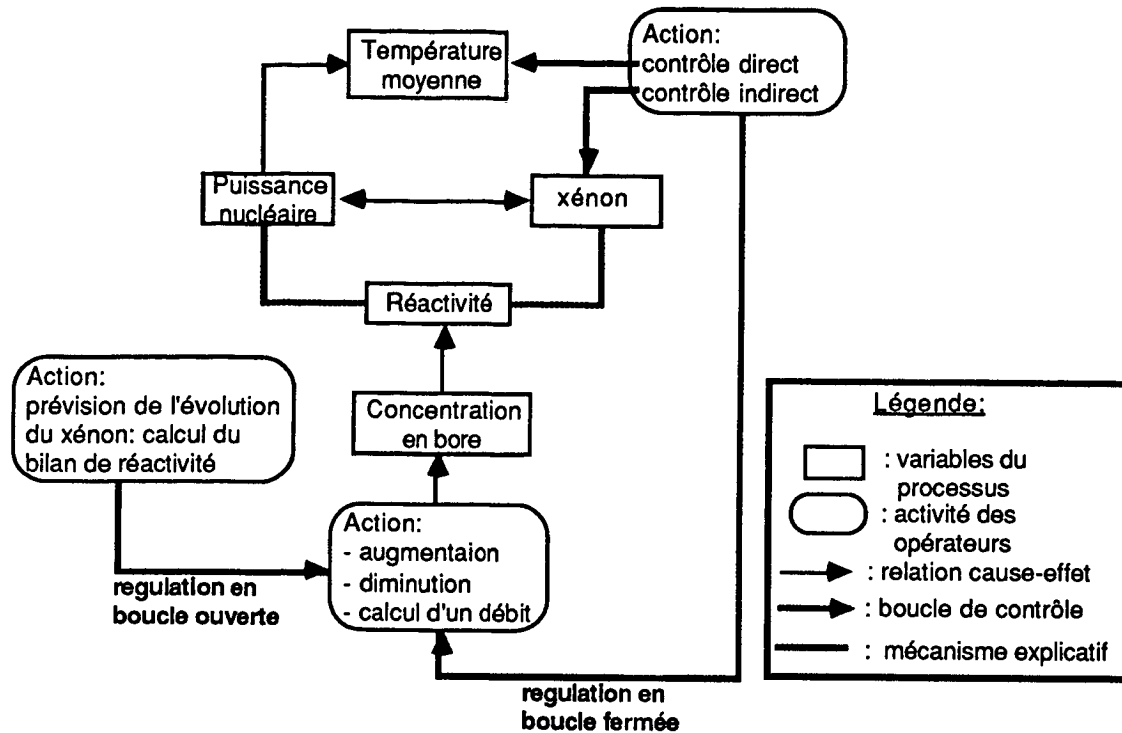


Figure 5: Boucles de régulation de l'interaction xénon-puissance nucléaire

* Contrôle et régulation du Delta I

Le Delta I donne une indication sur la distribution axiale du flux de neutrons dans le cœur. Une contrainte administrative stipule que si le Delta I sort de sa plage de variation autorisée de $\pm 5\%$ pendant plus d'une heure, alors le seuil de puissance de 87% ne pourra pas être dépassé pendant 12 heures. Cette contrainte peut être pénalisante si, par exemple, la variation de puissance consiste à baisser puis à remonter la puissance à 100%. Or les opérateurs sont en mesure de prévoir qu'une baisse de puissance va entraîner une variation du Delta I. Cette prévision repose sur la représentation des relations causales décrites à la Figure 6.

Le contrôle du Delta I s'effectue en **boucle ouverte**: dans le cas d'une variation de puissance comprenant une baisse puis une remontée, les opérateurs réalisent une action avant la baisse (borication) consistant à donner une valeur au Delta I inverse de celle prévue. Ainsi, s'il est prévu que le Delta I va avoir une valeur très négative, les opérateurs boriquent pour faire monter les barres de commande afin de donner une valeur très positive au Delta I: en fin de programme, le Delta I aura une valeur proche de sa valeur de consigne (0% de variation).

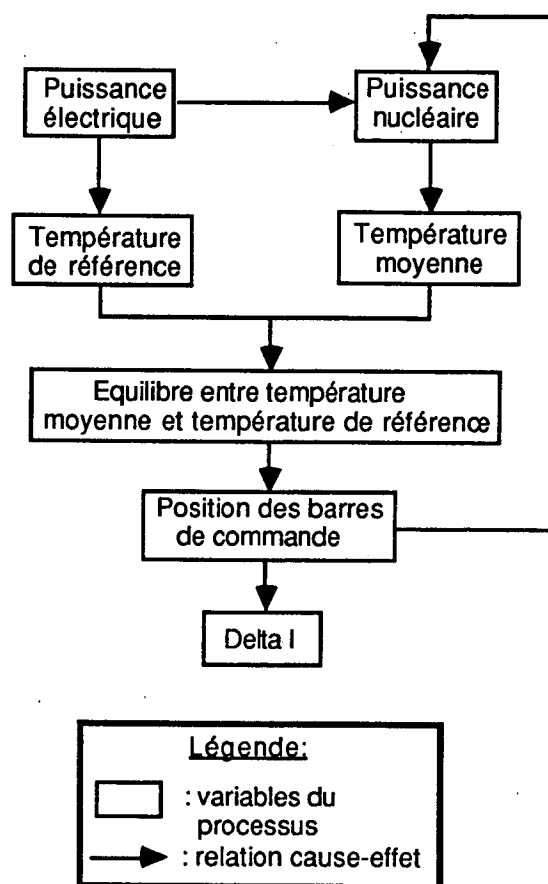


Figure 6: Représentation des relations causales expliquant la variation du Delta I

c) Mise en œuvre d'anticipation

Deux modes de régulation ont été mis en évidence dans le contrôle des variables. Une régulation en boucle fermée et une régulation en boucle ouverte: cette dernière est réalisée par la mise en œuvre d'anticipations, c'est-à-dire en dehors de tout feed-back avec le résultat d'une action ou bien avec la détection d'une évolution non désirée.

3. Conduite des transitoires rapides

Dans cette classe de situation, la tâche des opérateurs consiste essentiellement à contrôler et à confirmer le fonctionnement des automatismes enclenchés après une perturbation instantanée (ilôtage, Arrêt d'Urgence...). L'analyse de l'activité dans une situation de ce type (ilôtage) a fait l'objet d'une analyse plus fine, dans des conditions expérimentales identiques de celles décrites au § III - 2.2 (cf. Alengry, 1988b).

Nous soulignerons seulement qu'une succession de transitoires peut poser des problèmes d'identification d'états futurs du processus. Ainsi, dans la situation expérimentale évoquée ci-dessus, les opérateurs devaient évaluer l'évolution du xénon suite à: (1) une baisse

normale de puissance; (2) un ilôtage; (3) une stabilisation de la puissance; (4) une remontée. Dans ce cas de figure, les opérateurs estiment qu'ils ne sont plus en mesure de contrôler le xénon en boucle ouverte mais qu'ils le suivront à vue, par l'intermédiaire des variations de température.

IV - ACTIVITE DE L'OPERATEUR EN SITUATION DE FONCTIONNEMENT DEGRADE

Théoriquement l'opérateur ne se trouve pas démuné d'outil d'aide en situation dégradée: il est censé toujours pouvoir disposer d'une procédure de résolution d'accident et s'y tenir. En ce sens, la tâche et l'activité de résolution sont, en première analyse, fortement liées: la procédure est la tâche prescrite que les opérateurs doivent suivre pas-à-pas. C'est pourquoi nous présentons ci-dessous **l'activité en tant qu'exécution d'une procédure préplanifiée**. Cependant, nous avons montré dans Alengry & Pierret (1988) et dans Alengry & Tayssier (1988) que l'utilisation des procédures pouvait présenter des écarts avec la logique du travail des opérateurs.

1. Conduite des situations dégradées à l'aide de procédures

En situation dégradée, la tâche des opérateurs est guidée par des procédures de résolution d'accident qui sont des arbres de décision décrivant des stratégies de diagnostic et de conduite préplanifiées. Une procédure, donc l'activité des opérateurs, est décomposée en trois phases principales:

1.1 Traitement des symptômes de la situation dégradée

Dans cette phase, soit le diagnostic est déjà fait et les opérateurs doivent vérifier les symptômes qui les autorisent à entrer dans une procédure donnée, soit le diagnostic n'est pas fait et une (ou plusieurs) procédure amène les opérateurs à tester différentes hypothèses pour aboutir à l'identification de la situation et de la procédure de conduite à prendre.

1.2 Actions immédiates

Ces actions portent sur le fonctionnement des automatismes. Deux catégories d'actions peuvent être distinguées:

1.2.1 Actions de **contrôle** du fonctionnement des automatismes

Le contrôle consiste à vérifier les différents critères caractérisant la mise en service d'un automate donné, comme, par exemple, le positionnement d'organes, l'établissement de débits...

1.2.2 Actions de **confirmation** du fonctionnement des automatismes

La confirmation consiste en des actions qui ont pour but de créer des conditions logiques indispensables au fonctionnement des automatismes et qui pourraient ne pas avoir été élaborées automatiquement. Ces actions reviennent à élaborer un signal électrique essentiel dans le fonctionnement d'un automate. Ces actions sont systématiquement effectuées dans des conditions données.

1.3 Actions différées

Ces actions contribuent à la réalisation de deux buts successifs:

1.3.1 Stabilisation du processus

La stabilisation du processus nécessite une série d'actions dont la nature est déterminée par le type de dysfonctionnement et a pour but d'amener le processus soit dans un état standard soit dans un état proche. Quand la stabilisation du processus a été effectuée, la phase la plus critique a été réalisée: en effet, l'état dans lequel se trouve le processus est **identifié**, ce qui diminue ou élimine les ambiguïtés de choix de buts et d'actions. La stratégie consistant à amener la centrale dans un état identifiable, stable et connu avant de continuer à entreprendre des actions de régulation est si cruciale qu'elle peut aller jusqu'à **créer artificiellement une situation dégradée plus grave** mais correspondant à un cas prototypique pour lequel une stratégie de conduite a été étudiée. C'est par exemple le cas lorsque des pertes multiples d'alimentation électrique ne permettent plus aux opérateurs ni d'identifier les sources de polarité qui leur restent ni de discriminer les vraies informations des fausses qui leur sont retransmises en salle de commande: dans ce cas, une stratégie consiste à se priver volontairement de sources afin d'entrer dans un cas de figure connu, pris en compte par une procédure définissant les actions à réaliser pour stabiliser le processus.

1.3.2 Passage en état de repli

Le passage en état de repli consiste à réaliser des actions permettant de placer le processus dans un état tel que la réparation de la défaillance à l'origine de la dégradation du fonctionnement du processus est possible. Le passage en état de repli est déterminé par la gravité de la défaillance. Dans le cas d'un incident, il est fonction de l'indisponibilité liée au système défaillant.

2. Conduite des situations dégradées et mise en œuvre des fonctions de sûreté

Les fonctions de sûreté sont des conditions qu'il faut maintenir dans toutes les classes de situation, normales comme dégradées. Ces fonctions sont définies par rapport à des critères radiologiques d'admissibilité pour la population de relâchement de réactivité à l'environnement.

2.1 Description des fonctions de sûreté

Trois fonctions de sûreté sont à maintenir en permanence:

- le refroidissement du cœur
- le confinement de la réactivité
- le contrôle de la réactivité

Chacune de ces fonctions de sûreté est réalisée par des sous-fonctions:

- pour le refroidissement:
 - * masse d'eau dans le primaire
 - * circulation
 - * source froide
- pour le confinement:
 - * première barrière: gaines du combustible
 - * deuxième barrière: circuit primaire
 - * troisième barrière: enceinte
- contrôle de la réactivité:
 - * barres de commande
 - * bore

La représentation des fonctions de sûreté est une représentation hiérarchisée des fonctions et sous-fonctions qu'il faut maintenir (cf. Figure 7). Cette représentation d'une hiérarchie fonctionnelle constitue l'**état-cible** des opérateurs en toutes circonstances mais plus particulièrement en situation dégradée car cet état-cible est directement mis en cause par la dégradation du processus.

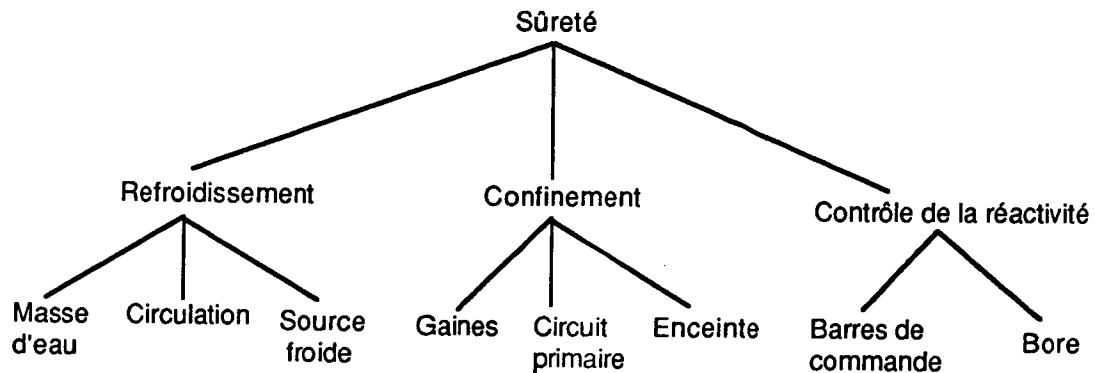


Figure 7: Hiérarchie des fonctions de sûreté

2.2 Mise en œuvre des fonctions de sûreté

En situation dégradée, la représentation hiérarchique des fonctions de sûreté doit être mise en œuvre, c'est-à-dire que les opérateurs doivent effectuer des traitements sur la base de cette représentation et d'une représentation de l'état du processus. Les traitements consistent:

- à identifier les caractéristiques physiques d'une situation accidentelle (par exemple: une rupture tube vapeur se caractérise par un appel de vapeur incontrôlé au secondaire)
- à propager les effets de ces caractéristiques physiques sur les variables liées aux fonctions de sûreté (par exemple: l'appel de vapeur va provoquer un refroidissement important de la masse d'eau et ce refroidissement risque de provoquer une augmentation de la réactivité)
- à identifier les actions automatiques qui vont se mettre en service pour maintenir les fonctions de sûreté (par exemple: Arrêt d'Urgence avec insertion des barres de commande pour diminuer la réactivité)
- identifier les actions manuelles qui doivent être effectuées conjointement aux actions automatiques pour maintenir les fonctions de sûreté (par exemple: isoler le Générateur de vapeur pour arrêter le refroidissement de la masse d'eau)

Ces deux derniers points impliquent la mise en œuvre de niveaux inférieurs dans la représentation de la hiérarchie des fonctions de sûreté décrite à la Figure 7, comme le montre l'exemple décrit à la Figure 8:

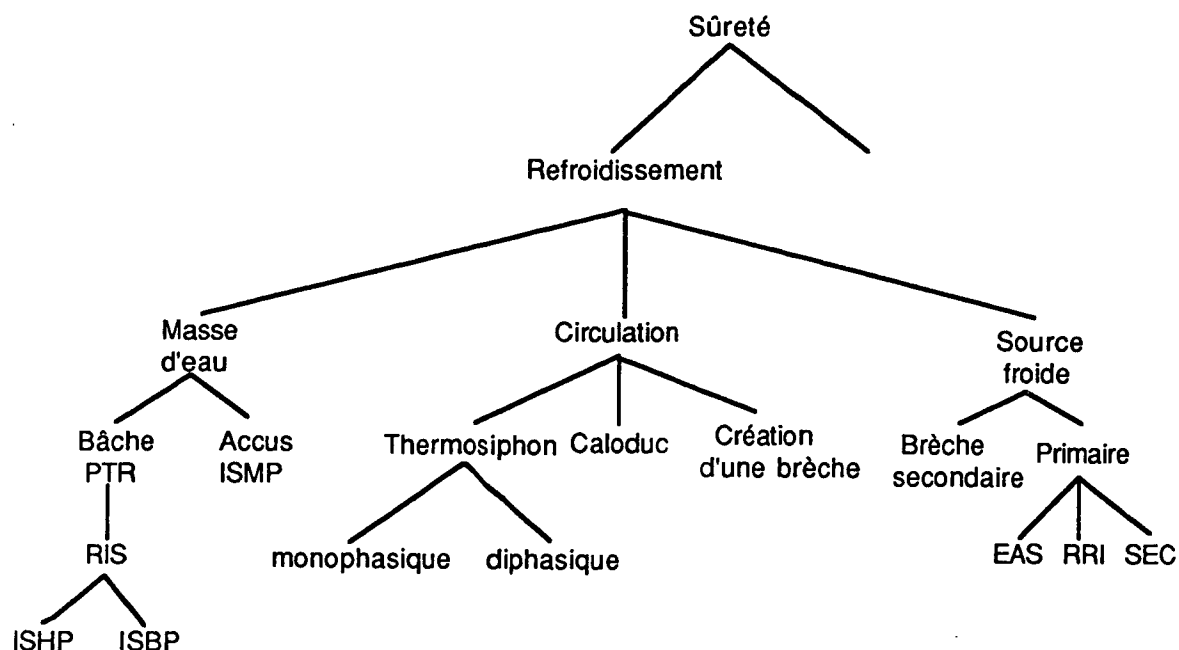


Figure 8: Niveaux de détail dans la mise en œuvre de la hiérarchie des fonctions de sûreté

Les procédures de résolution d'accident décrivent la mise en œuvre de cette hiérarchie des fonctions de sûreté de manière plus ou moins explicite.

3. Exigences liées au changement de contexte

Le passage d'un état normal à un état dégradé du processus induit un changement du contexte de la réalisation de la tâche de conduite. Le contexte peut être défini comme le résultat du croisement de plusieurs dimensions: (1) l'état du processus; (2) les risques associés à cet état; (3) les critères de conduite que se fixent les opérateurs et/ou définis par la tâche prescrite. Ce changement de contexte crée des exigences nouvelles pour l'activité cognitive des opérateurs, qui se traduisent par la nécessité de modifier la représentation du problème et ceci à plusieurs niveaux:

- au niveau du comportement physique de l'installation: le comportement de certaines composantes n'est pas identique en situation normale et dégradée. Par exemple, dans le cas d'une brèche, l'injection d'eau froide à haute pression (par l'Injection de Sécurité) a pour effet de modifier l'état du pressuriseur: la température des phases d'eau et de vapeur ne sont plus à l'état d'équilibre. Le pressuriseur passe donc de l'état de saturation à l'état de sous-saturation et n'a plus sa fonction de pressuriseur.

- au niveau des effets des actions: les actions peuvent ne plus avoir le même effet dans deux contextes différents. Par exemple, en relation avec la modification de l'état physique du pressuriseur décrit ci-dessus, l'action de mise en route des chaufferettes n'a plus pour effet de faire monter la pression mais de chauffer la phase liquide du pressuriseur
- au niveau de l'état-cible: le changement de contexte induit des changements de critères tels que favoriser la sûreté au lieu de la productivité. L'état-cible n'est plus dans ce cas l'équilibre entre les puissances nucléaire et électrique mais la conservation d'une marge à la saturation qui assure l'absence de vaporisation dans le circuit primaire
- au niveau des variables-cibles contrôlées: les variables par exemple utilisées en fonctionnement normale, comme le xénon et le Delta I, sont abandonnées au profit du ΔT_{Sat} qui donne une indication sur la marge à la saturation
- au niveau de la validité des indications fournies par certaines variables: par exemple, le niveau du pressuriseur ne constitue pas une indication fiable de la masse d'eau primaire dans certaines configurations accidentelles à cause du phénomène dit "de la bouteille de champagne"
- au niveau des attitudes: l'expérience de la conduite crée chez les opérateurs des attitudes envers certains événements. Par exemple, l'ouverture intempestives des vannes de décharge du pressuriseur est considéré comme un événement grave. Dans certaines configurations accidentelles le seul moyen d'assurer le refroidissement sera d'ouvrir volontairement ces vannes (c'est-à-dire de créer une brèche artificielle). La rigidité d'une attitude peut être dans ce cas un facteur important: une hésitation trop longue peut être pénalisante

Ces aspects liés au changement de représentation du problème nous semblent être un point crucial en situation de résolution d'accident: les opérateurs doivent pouvoir remettre en cause la validité des connaissances et procédures d'un contexte à l'autre. Cette caractéristique de l'activité cognitive devient plus critique lorsque les opérateurs sont confrontés à des accidents cumulés: ils doivent être en mesure de se représenter que la situation accidentelle traitée comportent plusieurs dimensions (par exemple dans le cas où un symptôme est commun à deux classes d'accident). Le problème réside dans les biais cognitifs qui peuvent apparaître comme, par exemple: traiter une situation exceptionnelle comme une situation de routine ou bien se focaliser sur une seule dimension de la situation.

V - CONCLUSION

Certains invariants de l'activité de conduite apparaissent d'une classe de situation à l'autre. Ces invariants concernent: (1) la mise en œuvre de représentations; (2) la dimension temporelle de la conduite d'un processus dynamique; (3) l'activité de surveillance; (4) l'activité d'anticipation et de prévision; (5) le rôle du contexte.

1. Représentations mises en œuvre dans la conduite

Les représentations mises en œuvre dans la conduite peuvent être caractérisées par: (1) la représentation de la tâche; (2) la représentation de l'état actuel du processus; (3) la représentation d'états futurs du processus; (4) la représentation conceptuelle du fonctionnement du processus; (5) la représentation de l'espace du problème.

1.1 Représentation de la tâche

La représentation de la tâche est définie par l'intégration des représentations de l'état actuel du processus (valeurs de variables d'état), de ses états futurs (dans quel sens vont évoluer les variables d'état), et des exigences qui doivent être respectées (quels sont les critères prioritaire: productivité vs sûreté). La représentation de la tâche détermine l'espace problème dans lequel les opérateurs élaborent leur activité de conduite (Figure 9).

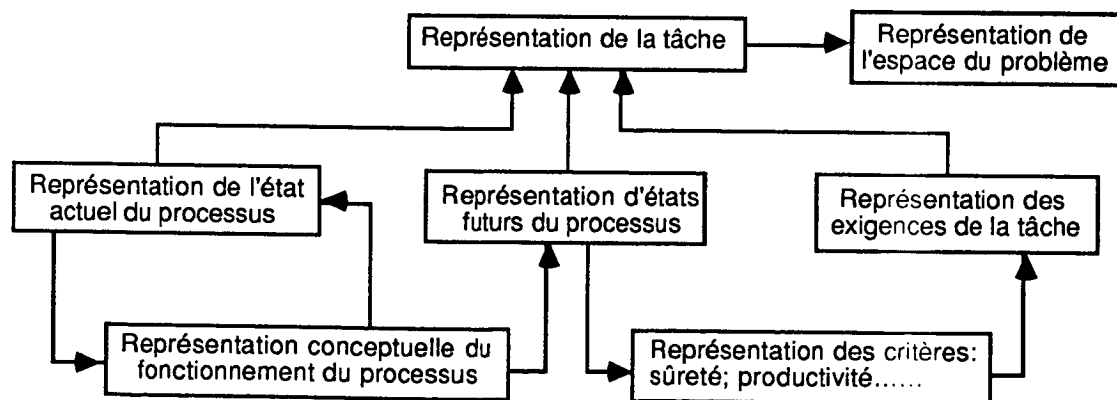


Figure 9: Organisation des différentes représentations impliquées dans la conduite du processus

1.2 Représentation de l'état actuel de processus

La représentation de l'état actuel du processus est construite à partir de la valeur des variables d'état qui caractérisent ses composantes. Par exemple, les états standards sont caractérisés par des valeurs prédéfinies. La représentation est ici une représentation statique.

1.3 Représentation d'états futurs du processus

La représentation d'états futurs est construite sur la base d'une activité prévisionnelle décrite ci-dessous (cf. § V - 4.).

La prévision peut consister à définir l'état qui va être rejoint par le processus par rapport à la dynamique d'une évolution actuelle (*par exemple: estimation des variations futures de la puissance nucléaire sur la base de l'allure de l'évolution en cours*) ou bien sur la base d'un événement perturbateur initial (*par exemple: estimation du nouvel état que va rejoindre la puissance nucléaire à la suite d'une modification de la puissance électrique*). Dans le premier cas, la représentation est **dynamique**, c'est-à-dire qu'elle est mise à jour en fonction des variations de l'évolution en cours. Dans le second cas, la représentation de l'état futur est **statique**: elle est une hypothèse de travail qui va être confirmée ou infirmée.

1.4 Représentation conceptuelle du fonctionnement du processus

L'interprétation du fonctionnement actuel et la prévision des états futurs du processus met en œuvre une représentation conceptuelle du fonctionnement du processus.

La représentation conceptuelle du fonctionnement du processus constitue le modèle de référence intériorisé par les sujets. L'hypothèse est que ce modèle a la fonction qu'a un modèle du point de vue des sciences exactes: il permet de simuler, donc d'expliquer, un phénomène et de faire des prédictions sur ses modalités d'occurrence. C'est en ce sens que nous appelons, de manière générale, la représentation conceptuelle qu'a un sujet du fonctionnement d'un système: **modèle mental**.

Lorsqu'on demande aux opérateurs d'expliquer le fonctionnement du processus, ils décrivent les **relations entre les variables** caractérisant l'état de ses composantes. Ces relations sont de nature causale: la variation d'une variable provoque la variation d'une variable causalement liée (*par exemple: la diminution de la température de la masse d'eau primaire provoque une diminution du niveau du pressuriseur*). Les modèles mentaux du fonctionnement du processus sont des **modèles causaux**.

La représentation du fonctionnement global du processus intègre les représentations du fonctionnement local des composantes du processus. On distinguera donc les **modèles globaux** des **modèles locaux** du fonctionnement du processus. Par exemple, la connaissance sur laquelle est fondée l'activité de régulation du xénon est un modèle local décrivant l'interaction entre puissance et xénon (Figure 10).

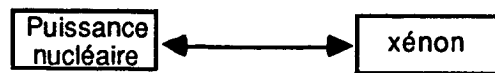


Figure 10: Modèle causal de l'interaction entre xénon et puissance

De tels modèles locaux sont utilisés dans la conduite courante du processus (par exemple: pour prévoir le comportement du xénon initié par une variation de puissance nucléaire et pour en inférer les actions de régulation appropriées).

Les actions sont des variables intégrés dans les modèles causaux: par exemple, l'action consistant à faire varier la concentration en bore produit un effet sur la puissance nucléaire (Figure 11).

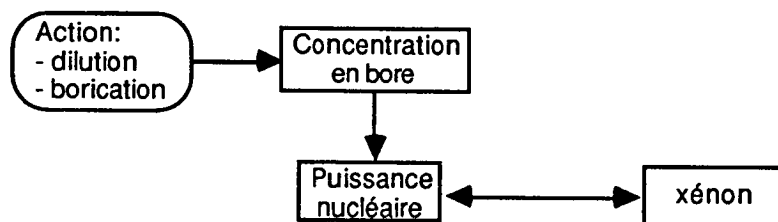


Figure 11: Modèle des relations causales entre xénon, puissance et l'action de modification de la concentration en bore

Un modèle causal peut décrire un phénomène à différents niveaux de détail. En effet, le modèle décrit à la Figure 11 définit un **grain de connaissance** relativement grossier. Il est probable que c'est à ce niveau de détail que les modèles causaux sont utilisés par les opérateurs dans la plus grande partie de l'activité cognitive de conduite. Même, si l'on s'en tient aux premières verbalisations des sujets dans l'expérience présentée dans Alengry (1988b), c'est-à-dire avant que l'expérimentateur n'intervienne systématiquement pour faire expliciter par les opérateurs leurs connaissances sous-jacentes, la relation est exprimée sous la forme: "Je dilue pour compenser le xénon". Le grain de connaissance du modèle causal peut être encore plus grossier mais la relation exprimée est de nature opérative et traduit le but direct de l'action de l'opérateur: réguler les variations d'une variable perturbatrice (Figure 12).

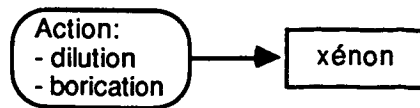


Figure 12: Relation causale opérative entre une action et la variable régulée

La nature explicative des modèles présentés aux Figures 11 et 12 est pauvre d'un point de vue informationnel: ces modèles n'expriment rien sur les relations entre variables. C'est de ce point de vue que nous disons que ces modèles causaux définissent l'explication des phénomènes à un niveau **macroscopique**.

Cependant les opérateurs disposent en mémoire de connaissances acquises soit par la formation, soit par l'expérience de la conduite qui leur permettent de se représenter à un grain de connaissance plus fin les phénomènes auxquels ils sont confrontés. Ils sont en mesure d'expliquer, jusqu'à un certain niveau de détail, les relations entre les variables traitées. C'est-à-dire qu'ils peuvent expliquer les **mécanismes** sous-jacents aux relations entre les variables. De ce point de vue, les modèles causaux décrivant les mécanismes explicatifs des relations entre les variables traitées définissent un niveau **microscopique** de l'explication. Ainsi, le modèle causal décrit à la Figure 12 peut être détaillé par les sujets par (1) la relation causale intervenant dans l'action de régulation observable; (2) les relations causales entre les variables traitées; (3) les relations causales expliquant les mécanismes sous-jacents aux variables traitées (Figure 13).

La possibilité qu'ont les opérateurs de réguler une variation non désirée traduit leur **performance** dans l'activité de conduite. La possibilité qu'ont les opérateurs d'expliquer les mécanismes sous-jacents à leur performance traduit leur **compétence** dans l'activité de conduite.

Cette idée de hiérarchisation des connaissances a été évoquée par Rasmussen (1986) dans son modèle du comportement de l'opérateur décomposant l'activité de prise de décision en comportements basés (1) sur les habiletés sensori-motrices, (2) sur les règles et (3) sur les connaissances. Le comportement basé sur les règles correspondrait au niveau de la relation utilisée dans l'action de régulation de la Figure 13. Le comportement basé sur les connaissances correspondrait aux deux niveaux d'explication présentés à la Figure 13 et seraient fondés sur les principes de base du fonctionnement et de la structure d'un système. Il semblerait que la conceptualisation présentée par Rasmussen peut être enrichie par l'ajout de niveaux intermédiaires ou bien par l'ajout de catégories à l'intérieur d'un niveau de comportement. Par exemple, entre la règle d'action et les mécanismes explicatifs présentés à la Figure 13, nous avons distingué un niveau intermédiaire: celui des variables traitées. Ce niveau intermédiaire peut être intégré au niveau du comportement basé sur les règles, car il traduit une relation <condition> -> <conclusion>:

Si modification de la concentration en bore
 -> modification de la puissance primaire

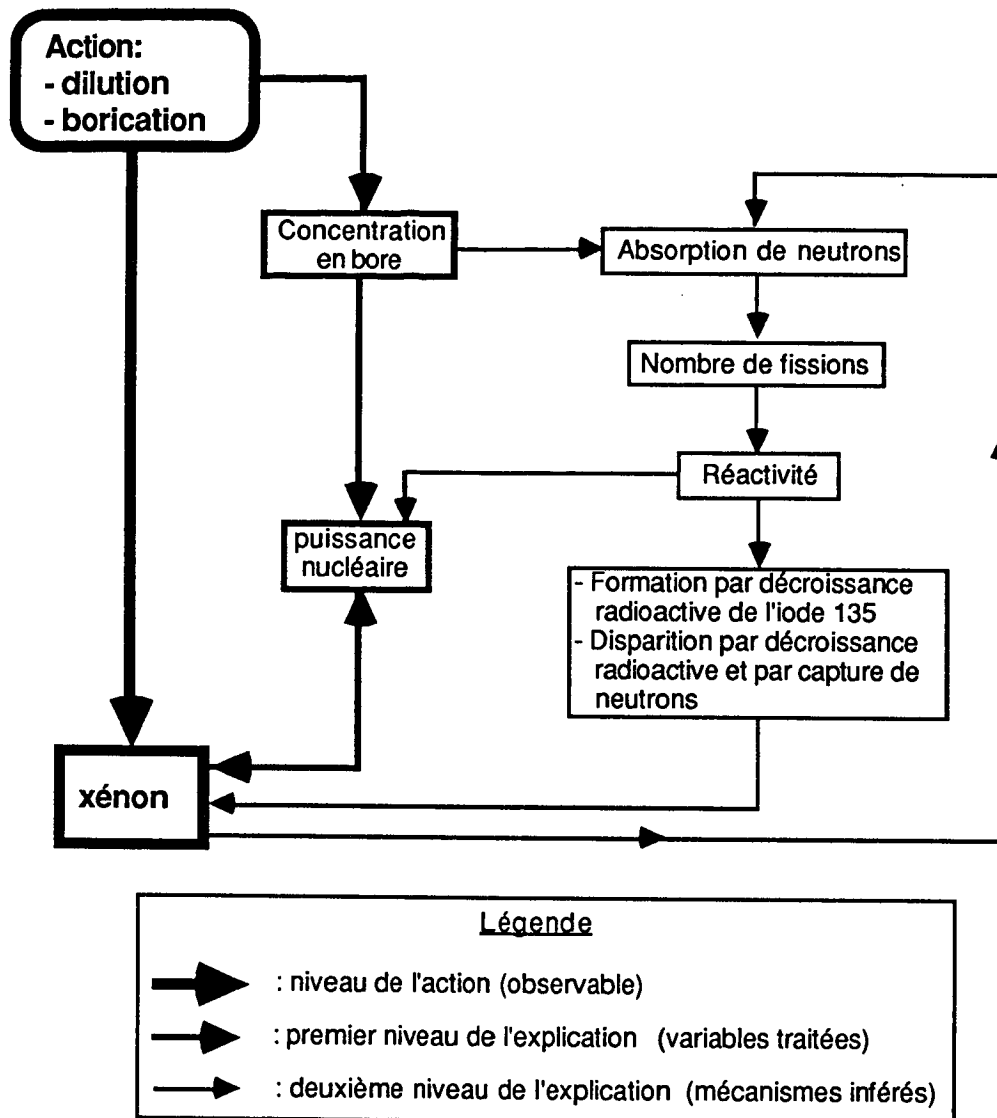


Figure 13: Modèle intégrant différents niveaux d'explication d'une action de régulation

Cependant, ce niveau intermédiaire peut également être attaché au niveau du comportement basé sur les connaissances: il exprime une relation de causalité physique entre les variables du processus.

L'idée de hiérarchisation des connaissances est également un thème de recherche important de l'Intelligence Artificielle (e.g., Chandrasekaran et Mittal, 1983; Hart, 1982; Michie, 1982; Nau, 1983; Steels, 1987), notamment dans le cadre de la conception de systèmes experts en diagnostic. Clancey (1983) a montré que les règles d'expertise transmises par des experts dans certaines maladies du sang intégraient des connaissances implicites que les médecins ont enfouies (compilées) au cours de leur expérience

professionnelle. Clancey illustre ce point de vue avec une règle du système expert médical MYCIN (Shortliffe, 1976), traitant des maladies infectieuses:

Si le patient a moins de 8 ans
-> ne pas prescrire de tétracycline

Cette règle est expliquée par les relations causales suivantes:

administration de tétracycline chez les enfants

=> propagation de la substance dans les os en croissance
=> décoloration des dents
=> modification non désirée de l'état du patient
=> ne pas administrer de tétracycline

La nécessité est apparue aux chercheurs dans ce domaine de pouvoir concevoir des programmes de diagnostic ou thérapeutique qui considèrent les cas à des niveaux variés de détail pour intégrer la compréhension globale du cas. En effet, les auteurs (e.g., Patil et al., 1981) distinguent plusieurs niveaux d'appréhension d'un cas: (1) au niveau le plus superficiel, le diagnostic peut être établi en termes des associations les plus fréquentes maladie-syndrôme sur la base d'une classification utilisant des degrés de croyance; (2) au niveau le plus profond, le diagnostic peut nécessiter une interprétation biochimique des faits anormaux expliquant de manière causale la pathogénèse du cas.

Dans le domaine médical comme dans celui du contrôle de processus, établir un diagnostic ou, de manière plus générale, interpréter une situation donnée nécessite cette étendue de représentations. L'hypothèse de travail étant que les connaissances les plus superficielles (les règles) peuvent ne plus être valides dans deux contextes différents et notamment dans les situations accidentelles complexes. Dans ces situations, les opérateurs ont recours à leurs connaissances de base sur les principes fonctionnels et structurel du processus, c'est-à-dire à leur compétence, pour résoudre le problème posé par la situation accidentelle.

1.5 Représentation de l'espace du problème

Les opérateurs réalisent leur activité de conduite dans un espace problème construit par l'intégration des états actuels et futurs du processus et des exigences particulières à une classe de situation. L'espace du problème est la représentation définissant l'état initial du problème, le but et l'espace des états possibles d'un système et les actions de transformation permises permettant de passer d'un état à un autre.

Deux grandes classes de régime de fonctionnement peuvent caractériser un système dynamique comme une centrale nucléaire: le fonctionnement stabilisé et le fonctionnement en transitoire. Selon le régime de fonctionnement, l'état-cible visé par les opérateurs diffère et l'espace du problème peut être caractérisé différemment.

1.5.1 Espace problème en régime stabilisé

En régime stabilisé, l'état-cible est un **état d'équilibre à préserver**. La conséquence, du point de vue de l'activité des opérateurs est de contrôler les variables qui risquent de modifier l'état d'équilibre (cf. III. 2.2.2.). L'espace du problème se caractérise par la structure (1) des états possibles que peuvent prendre les variables perturbatrices; (2) des inférences liées aux variations de ces états et (3) des décisions d'action issues du résultat des inférences. Par exemple, l'espace problème de la conduite en fonctionnement stabilisé à pleine puissance construit à partir des interviews des opérateurs, peut être décrit par le graphe présenté à la Figure 14.

1.5.2 Espace problème en régime transitoire

En régime transitoire l'état-cible est un **état à rejoindre**. L'activité est déterminée dans ce cas par la recherche des fonctions et sous-fonctions à mettre en œuvre pour réaliser le passage entre deux états. L'espace problème peut être décrit dans ce cas, comme l'a proposé Rasmussen (1986), par la représentation des propriétés fonctionnelles du processus en termes des relations moyens-fins à l'intérieur d'une hiérarchie d'abstraction fonctionnelle du processus (Figure 15)

Une telle représentation décrit de bas en haut quelles composantes ou fonctions peuvent être mises en œuvre et comment elles peuvent être utilisées pour la réalisation d'objectifs de plus haut niveau et, de haut en bas, comment des objectifs peuvent être réalisés par des composantes et des fonctions. C'est par exemple sur la base de cette représentation que la hiérarchie des fonctions de sûreté présentée à la Figure 7 (cf. § III - 3.1) est mise en œuvre. La description par les opérateurs de la tranche en état d'arrêt à froid des actions qu'ils auraient à entreprendre dans la prévision d'événements anormaux mettant en cause les fonctions de sûreté (cf. § III - 1.3.4) traduit l'utilisation d'une représentation de ce type (*par exemple: en cas de fuite sur le circuit RRA mettant en cause la fonction de refroidissement du cœur, on mettrait en recirculation la bache PTR par la mise en service de la pompe ISBP IPO*).

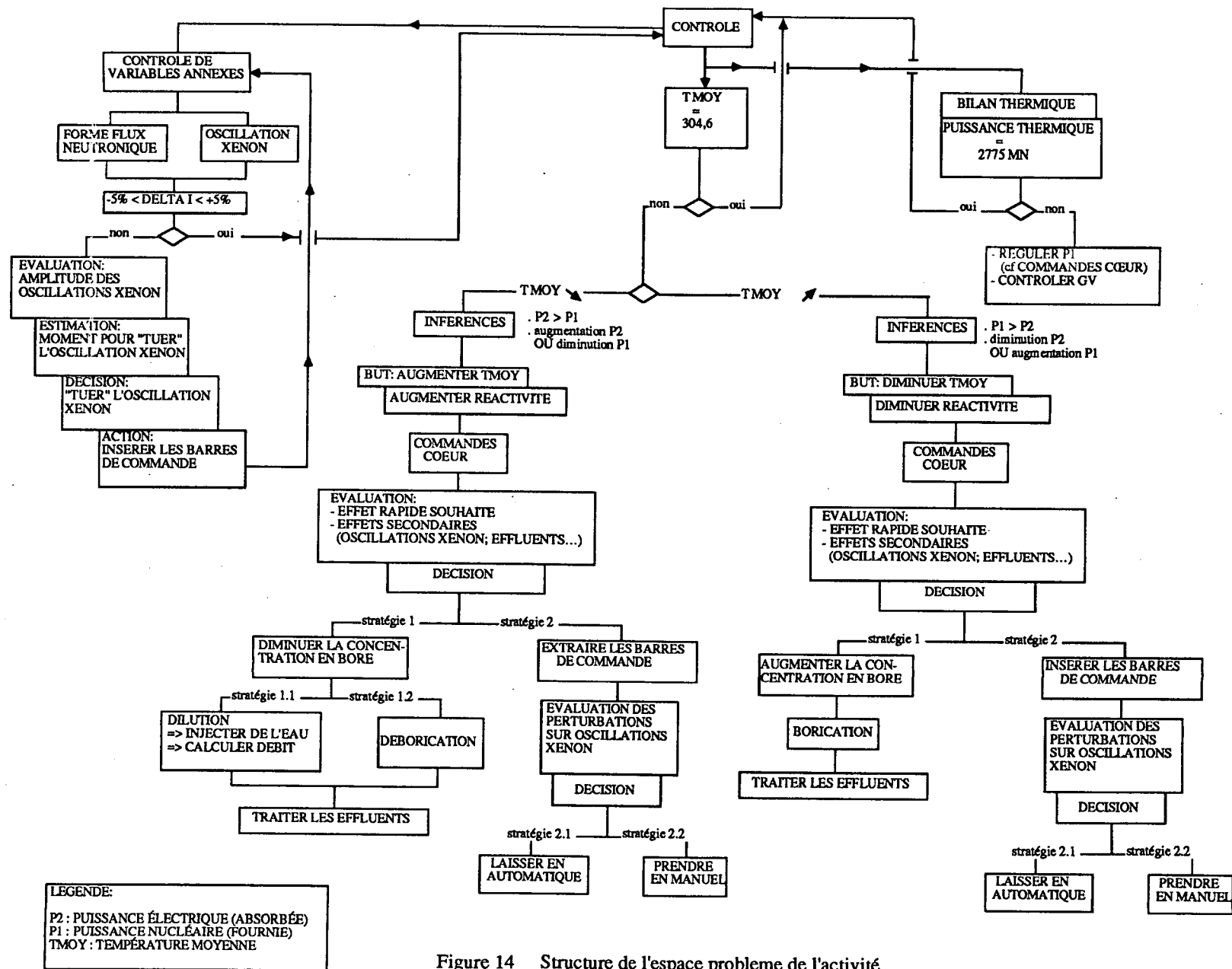


Figure 14 Structure de l'espace problème de l'activité de conduite en fonctionnement à pleine puissance

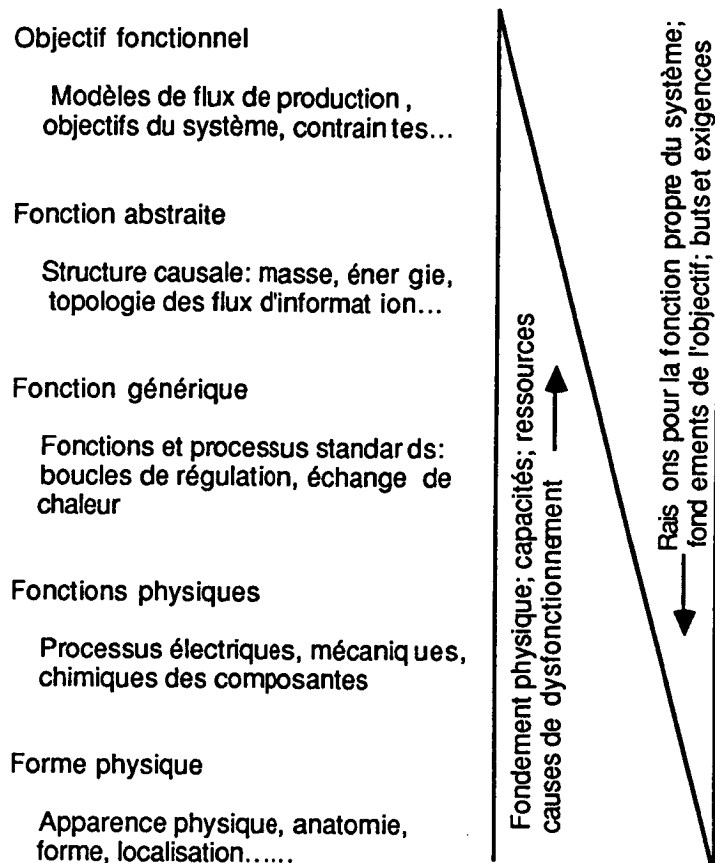


Figure 15: Hiérarchie d'abstraction moyens-fins utilisée pour la représentation des propriétés fonctionnelles d'un système. (D'après Rasmussen, 1986)

La représentation de la hiérarchie fonctionnelle du système a par ailleurs d'autres fonctions que la recherche des moyens à mettre en œuvre pour atteindre un but. Une fonction dans la hiérarchie est définie par des valeurs de paramètres et par l'état des systèmes qui réalisent la fonction. Connaissant la valeur des paramètres (débit, température, pression) et l'état des systèmes (marche/arrêt/indisponible, en service/hors service), il est possible d'inférer rétrospectivement les caractéristiques de l'état actuel de la fonction concernée. Par exemple, lors de la phase d'observation réalisée sur la tranche en état d'arrêt à froid, un opérateur a décrit l'état du condenseur en partant de l'état de ses descripteurs à l'intérieur de la hiérarchie des fonctions qui réalisent la fonction de cette composante du processus (Figure 16).

Inversement de haut en bas de la hiérarchie fonctionnelle, connaissant l'état de la fonction supérieure en service/hors service), il est possible d'inférer prospectivement l'état des systèmes et les valeurs des paramètres associés à cette fonction.

Une distinction peut être faite entre représentation conceptuelle du fonctionnement du processus en termes de modèles causaux ou en termes de représentation fonctionnelle hiérarchisée. Or il est probable qu'en situation de conduite les opérateurs passent d'une représentation à l'autre pour construire une représentation des états actuels et futurs du processus et pour rechercher quelle fonction il faut mettre en œuvre.

2. La dimension temporelle de l'activité de conduite

La dimension temporelle joue un rôle important dans la conduite du processus. Elle intervient de deux façons: comme un élément d'information à traiter et comme une contrainte sur les conditions de réalisation des tâches.

2.1 Le temps comme un élément d'information à traiter

Le traitement du temps se traduit par la représentation (1) de points dans le continuum temporel (*par exemple: détermination du moment opportun pour tuer une oscillation xénon*); (2) d'évolutions à l'intérieur d'intervalles temporels (*par exemple: identification de l'amplitude atteinte par le xénon pendant les 12 dernières heures*); (3) de l'historique du processus (*par exemple: état du processus laissée par l'équipe précédente*); (4) d'états futurs du processus (*par exemple: une variation de température va entraîner l'insertion des barres de commandes*). La construction de ces représentations peut être réalisée par le traitement des informations sur l'état actuel, passé et futur du processus. Les informations sur les états futurs du processus sont traitées sur la base d'une **activité prévisionnelle** (cf. § 4. ci-dessous).

2.2 Le temps comme contrainte agissant sur la réalisation des tâches

Le temps comme contrainte est directement lié aux caractéristiques de l'évolution du processus dans une classe de situation donnée. Trois cas peuvent être distingués, (1) temps de réponse lent et (2) temps de réponse rapide, et une situation intermédiaire (3) temps de réponse moyen.

2.2.1 Temps de réponse lent

Dans le premier cas de figure, l'inertie du système est importante (*par exemple: la manœuvre de premier redémarrage à froid s'effectue sur 2 relèves ou bien: les opérateurs traitent des variables - comme le xénon - dont le cycle d'évolution est de 28 h*) et impose des contraintes de planification et de contrôle de l'exécution du plan.

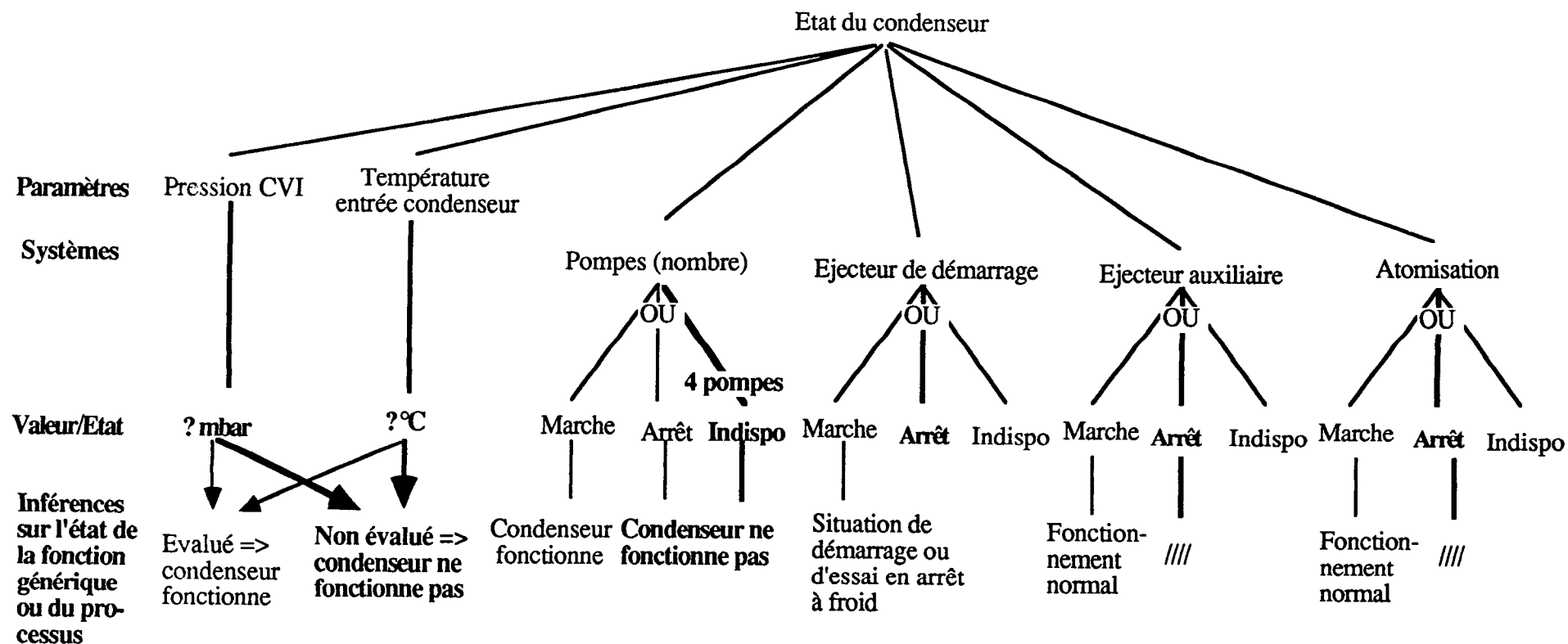


Figure 16: Evaluation de l'état d'une fonction générique (condenseur) à partir de l'identification des valeurs de paramètre et de l'état des systèmes impliqués dans son fonctionnement (les caractères gras indiquent l'état du condenseur pour une tranche en état d'arrêt à froid pour intervention)

Les difficultés rencontrées résident dans la possibilité de planifier les étapes du plan du fait de la marge d'erreur liée aux estimations prévisionnelles (*par exemple: déterminer le moment où les conditions chimiques d'un circuit seront obtenues pour le mettre en service*).

D'autres difficultés sont liées à l'importance du nombre de tâches réalisées en temps partagé, avec les problèmes de charge de travail mentale et physique, pouvant affecter la qualité du travail (*oubli d'opération, par exemple*).

Enfin, l'inertie lente du système et la répartition d'une tâche sur plusieurs relèves posent la question de l'homogénéité des styles de conduite d'une équipe à l'autre: il se peut que des évolutions soient estimées différemment ou bien que le choix des actions de régulation ne soit pas identique d'une équipe à l'autre.

2.2.2 Temps de réponse rapide

Dans le deuxième cas de figure, la réponse du système est quasiment immédiate et l'activité des opérateurs consiste essentiellement à contrôler que les séquences des automatismes de protection se sont déroulées correctement. Les difficultés rencontrées résident dans le risque d'omettre une étape de la vérification.

2.2.3 Temps de réponse moyen

Il est difficile de quantifier le qualificatif "moyen". Nous entendons par là les temps de réponse qui sont suffisamment longs pour permettre aux opérateurs de réaliser une analyse de l'état du processus. Par exemple, dans le cas d'accidents thermohydrauliques, les études de sûreté montrent que les variables utilisées pour réaliser un diagnostic mettent au moins 5 mn pour se stabiliser. Durant ces 5 mn, les opérateurs ont les délais nécessaires pour contrôler le fonctionnement des automatismes, identifier les variables qui évoluent, leur sens et leur gradient d'évolution. Ces situations posent un problème de l'ordre de la prise de décision: en fonction de la nature des évolutions, est-il pertinent d'intervenir manuellement ou de laisser faire les automatismes ?

2.2.4 Temps de réponse et initiative laissée aux opérateurs

Les trois types d'évolution cités ci-dessus se distinguent du point de vue des possibilités d'intervention laissées aux opérateurs pour modifier l'état du processus: dans le premier cas, les interventions sont possibles mais contraintes par un plan, soit fixé par des consignes, soit construit par les opérateurs pour une manœuvre particulière. Dans le deuxième cas, de telles interventions ne sont ni possibles ni souhaitables.

Il existe cependant un cas de figure intermédiaire: celui des temps de réponse moyens, où les opérateurs voient dériver un paramètre et doivent décider soit de laisser agir les automatismes, soit de procéder à une régulation manuelle. La philosophie sous-jacente à la conception des centrales est de laisser fonctionner tout en automatique aussi longtemps que possible. Le postulat étant que les automatismes sont bien dimensionnés pour récupérer des dérives de paramètres et que, si les régulations normales s'avèrent inefficaces et que l'état du processus continue à se dégrader, alors les protections automatiques (Injection de Sécurité, Arrêt d'Urgence) vont s'enclencher. Un autre argument en faveur de la décision consistant à laisser agir les automatismes est basé sur le risque qu'il y a à intervenir sur l'état du processus alors qu'il n'est pas possible d'identifier l'état que celui-ci va rejoindre.

Cependant, on sait que les opérateurs travaillent avec des critères de productivité et de ménagement des matériels. Or un Arrêt d'Urgence ou une Injection de Sécurité, d'une part interrompent la production, et, d'autre part, sont comptabilisés, car ils provoquent des contraintes physiques sévères sur le matériel. Il doit exister des situations où les critères de sûreté s'opposent aux critères de productivité et de ménagement des matériels. Le problème est de l'ordre de la prise de décision, qui dépend de l'évaluation respectivement des critères de risque et de productivité par les opérateurs.

3. Activité de surveillance

En outre des surveillances de routine consistant à passer en revue l'ensemble des panneaux de contrôle, deux niveaux dans l'activité de surveillance ont été identifiés.

A un premier niveau d'analyse, l'activité de surveillance porte sur l'**état-cible** que se sont fixés les opérateurs (*par exemple: en fonctionnement à pleine puissance, l'état-cible est l'ajustement de la puissance fournie par le réacteur à la puissance absorbée à la turbine; en fonctionnement en état d'arrêt à froid: le maintien des fonctions de sûreté*). Cependant, les états-cibles sont contrôlés par l'intermédiaire de **variables-cibles** (*par exemple: la surveillance de la température permet d'avoir une indication sur l'équilibre entre les puissances fournies et absorbées; la surveillance du niveau pressuriseur permet d'avoir une indication de la masse d'eau primaire, le débit RRA, de la circulation*). L'identification des variations de la variable-cible permet de faire des inférences sur les modifications (actuelles ou anticipées) de l'état-cible et de déterminer l'action correctrice qui doit être entreprise (cf. Figure 17 illustrant la surveillance de l'équilibre des puissances via la température moyenne en situation de fonctionnement à pleine puissance).

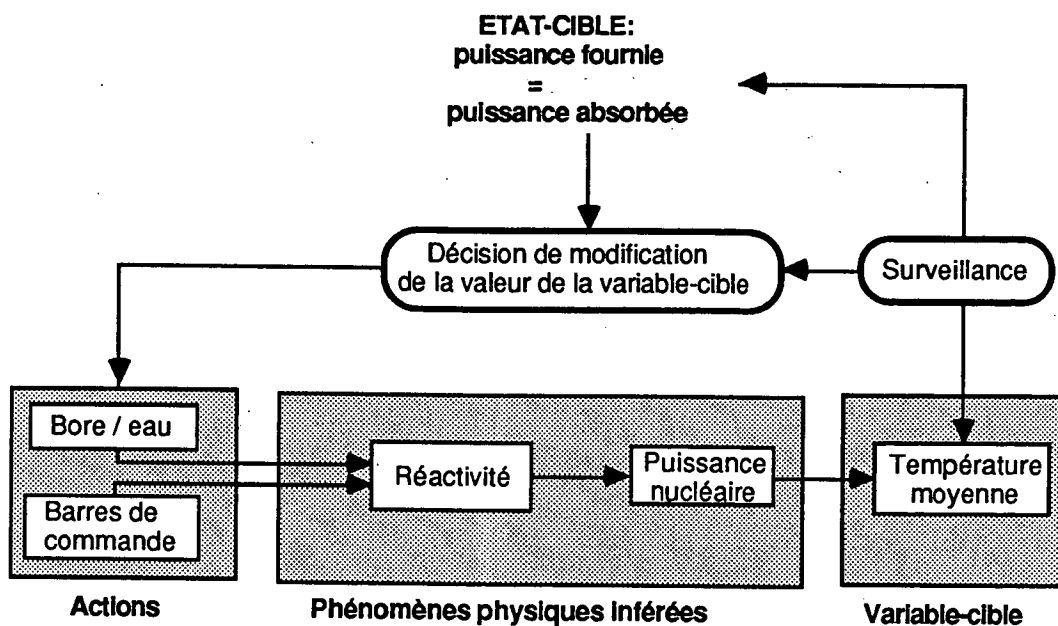


Figure 17: Représentation des niveaux de surveillance du processus

La surveillance des variables-cibles peut se justifier de deux manières:

- soit l'opérateur ne dispose pas d'indication directe sur l'état-cible et il sélectionne une variable-cible causalement liée
- soit l'opérateur surveille une variable-cible afin d'avoir une indication anticipée sur la modification de l'état-cible et donc d'agir par anticipation.

4. Activités d'anticipation et de prévision

4.1 Activité d'anticipation

L'activité de conduite peut s'effectuer en feed-back, par réponse à un stimulus tel qu'une évolution de variable ou une alarme. Cependant, lorsque les opérateurs sont en mesure de le faire, ils n'attendent pas d'avoir une évolution non désirée pour intervenir et travaillent en boucle ouverte, indépendamment de la signalisation d'un défaut et des résultats de l'action. Dans ce cas, ils agissent par anticipation. L'activité d'anticipation est basée sur une activité plus fondamentale qui permet de déterminer quels vont être les états futurs du système: l'activité de prévision.

4.2 Activité de prévision

Les opérateurs sont en mesure d'estimer les états futurs, normaux ou anormaux, du processus qu'ils contrôlent. Cette capacité à prévoir les transformations futures du processus qu'ils contrôlent traduit la connaissance qu'ont les opérateurs de la dynamique du processus.

4.2.1 Restriction du champ des possibles

La fonction d'une prévision est de maîtriser l'étendue des évolutions potentielles du processus, c'est-à-dire de n'envisager qu'un ensemble restreint des états possibles. Cette fonction est importante car elle permet aux opérateurs de se focaliser sur un sous-ensemble des variables du processus: elle a un intérêt économique. L'activité de surveillance n'est ainsi pas dispersée sur des variables de moindre importance dans une situation donnée. L'activité de prévision débouche aussi bien sur l'identification d'**états futurs possibles** que sur le rejet d'**états futurs impossibles**. C'est par exemple le cas lorsque les opérateurs affirment que la pression de l'enceinte de confinement ne peut pas évoluer parce qu'il n'y a pas de vapeur dans le circuit, ni d'eau sous pression. C'est également le cas lorsqu'ils expliquent que si la pression du circuit primaire est égale à la pression atmosphérique, toute prévision de fuite primaire peut être exclue parce qu'une fuite ne peut se produire que s'il y a un écart de pression entre la pression primaire et la pression extérieure

Par ailleurs, une prévision crée un système d'attentes qui définit les états futurs plausibles: ce système d'attentes permet aux opérateurs d'envisager par avance les réponses appropriées dans le cas de l'occurrence de l'un de ces états. C'est ce que montre les résultats des interviews des opérateurs de la tranche en état d'arrêt à froid (cf. § III - 1.3.4.).

4.2.2 Processus sous-jacents à l'élaboration de prévisions

L'activité de prévision se traduit par un résultat. Ces résultats peuvent être obtenus de deux façons: ils peuvent être déjà stockés en mémoire et rappelés ou bien ils peuvent être construits.

a) Récupération en mémoire de résultats de prévision déjà construits

Deux modes de stockage des résultats sont apparus au cours des observations:

- **images de courbes d'évolution:** pour prévoir une évolution, les opérateurs peuvent faire appel à des images de courbes décrivant l'évolution typique d'une variable. Par exemple les opérateurs indiquent que l'évolution du xénon suit une courbe toujours identique: il passe par un pic puis par un creux avant de se stabiliser
- **schéma intégrant une succession d'événements prototypiques:** au fur et à mesure de l'expérience du contrôle du processus, les opérateurs ont construits des connaissances schématiques décrivant une série d'évolutions provoquées par un événement perturbateur. Par exemple: lors d'une baisse de puissance électrique, la température moyenne va augmenter, les barres de commandes vont s'insérer dans le cœur. Ces connaissances schématiques sont évoquées telles quelles et ne nécessitent plus l'utilisation de modèles causaux du fonctionnement du processus pour être justifiées.

b) Construction du résultat des prévisions

La construction de prévisions peut être effectuée sur la base d'équations mathématiques ou bien sur la base des modèles qualitatifs des relations causales entre les variables du processus:

- **construction de la prévision à l'aide d'équations.** C'est par exemple le cas lorsque les opérateurs font un bilan de réactivité pour prévoir les évolutions des variables (par exemple: prévision de l'évolution du xénon) liées à la réactivité après une variation de la puissance nucléaire.
- **construction de la prévision fondée sur des modèles causaux et qualitatifs du fonctionnement du processus:** dans ce cas, les opérateurs propagent une perturbation initiale sur les variables d'état du processus liées par une relation causale. Les valeurs de variables sont caractérisées par des grandeurs qualitatives (e.g.: augmente, diminue stable). Par exemple: la diminution de la puissance nucléaire provoque une augmentation du xénon qui fait diminuer la réactivité.

5. Rôle du contexte dans l'activité de conduite

Nous avons noté ci-dessus l'importance du rôle du contexte et son implication du point de vue de la nécessité de changer de représentation pour s'adapter aux caractéristiques d'une situation nouvelle.

Il semble qu'il s'agit là d'une caractéristique essentielle de l'activité de conduite. L'exigence cognitive consiste à homogénéiser l'état interne de l'opérateur (c'est-à-dire l'espace problème dans lequel il évolue) avec l'état externe du processus (cf. § IV - 3.).

Le "monde" dans lequel évolue les opérateurs est étendu à l'exhaustivité des états possibles du processus et des tâches qu'ils ont en charge. Cependant, l'espace problème défini par ce monde est trop important pour être exploré par les opérateurs. De fait, l'espace du problème est circonscrit en fonction des caractéristiques circonstancielles de l'état actuel ou prévisible du processus et des tâches exigées: cette circonscription amène les opérateurs à travailler dans des "micro-mondes". Un micro-monde définit un contexte dans lequel le raisonnement est élaboré sur un ensemble des possibles restreint, c'est-à-dire où les inférences ont un degré de validité déterminé, et dans lequel les attentes sont limitées, ce qui permet aux opérateurs d'actualiser et de maintenir un accès plus rapide aux procédures de régulation associées à ces attentes.

Le passage d'un micro-monde à un autre implique la focalisation du raisonnement sur des modèles de fonctionnement locaux différents ainsi que le passage à différents niveaux de la hiérarchie de la représentation fonctionnelle du processus. Il est probable que ces changements de contexte nécessitent l'utilisation de plusieurs représentations hiérarchiques: hiérarchie de mise en œuvre fonctionnelle, hiérarchie des classes d'accidents connus, hiérarchie des risques, hiérarchie des fonctions de sûreté, hiérarchie des tâches...

Une direction de recherche que nous menons actuellement (Alengry & Pierret, 1988; Pierret & Alengry, 1988) concerne l'approfondissement de l'analyse du fonctionnement cognitif de l'opérateur à l'intérieur d'un espace problème multi-hiérarchique, dans l'objectif d'identifier les fonctionnalités d'une assistance logicielle qui lui permettrait de gérer cet espace problème complexe.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alengry, P. (1988a) *Analyse du Travail de Pilotage d'une Centrale Nucléaire (I): Le Système Socio-Technique*. Rapport INRIA, Décembre 1988.
- Alengry, P. (1988b) *Représentation des Modes Opératoires et des Connaissances Evoqués par des Opérateurs de Centrale Nucléaire dans une Tâche de Pilotage Simulée*. Rapport INRIA, Décembre 1988.
- Alengry, P. & Pierret, C. (1988) *Formalisation des Connaissances et du Raisonnement dans une Activité de Diagnostic: Le cas des Accidents par Brèche dans les Centrales Nucléaires*. Rapport INRIA, Décembre 1988.
- Alengry, P., & Tayssier, O. (1988) *Analyse de l'Activité d'Opérateurs de Centrale Nucléaire en Situation d'Accidents Cumulés*. Rapport INRIA, Décembre 1988.
- Chandrasekaran, B., & Mittal, S. (1983) Deep versus Compiled Knowledge Approaches to Diagnostic Problem Solving. *International Journal of Man-Machine Studies*, 19, 425-436.
- Clancey, J. (1983) The Epistemology of a Rule-Based Expert System: A Framework for Explanation. *Artificial Intelligence*, 20, 215-251.
- Hart, P.E. (1982) Directions for AI in the Eighties. *SIGART Newsletter*, ACM, January 1982, 11-16.
- Michie, D. (1982) High-Road and Low-Road Programs. *AI Magazine*, 3, 1, 21-22.
- Nau, D. (1983) Expert Computer Programs. *Computer*, Fév. 1983, 63-85.
- Patil, R.S., Szolovits, P., & Schwartz, W.B. (1981) Causal Understanding of Patient Illness in Medical Diagnosis. *Proc. of the IJCAI 1981*, 893-899.
- Pierret, C., et Alengry, P. (1988) Le Rôle des Objets dans la Structuration des Connaissances: Aide au Diagnostic Technique. *Colloque ERGO/IA'88*, Biarritz, France, 4-6 Octobre 1988.
- Rasmussen, J. (1986) *Information Processing and Human-Machine Interaction: An Approach to Cognitive Engineering*. North-Holland.

Shortliffe, E.H. (1976) *Computer-Based Medical Consultation: MYCIN*. Elsevier: New York.

Steels, L. (1987) The Deepening of Expert Systems. *AICOM*, 1, 9-16.

